



TITLE:

超軟弱粘土の工学的性質とその安定処理に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

嘉門, 雅史

CITATION:

嘉門, 雅史. 超軟弱粘土の工学的性質とその安定処理に関する研究. 京都大学, 1979, 工学博士

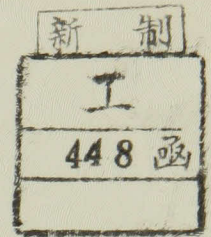
ISSUE DATE:

1979-07-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r3937>

RIGHT:



超軟弱粘土の工学的性質と その安定処理に関する研究

昭和 54 年 2 月

嘉 門 雅 史

超軟弱粘土の工学的性質と その安定処理に関する研究

昭和 54 年 2 月

嘉 門 雅 史

目 次

第 1 章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 超軟弱粘土とその問題点	2
1.2.1 超軟弱粘土の定義	2
1.2.2 ヘドロの定義と分類	3
(1) ヘドロの定義	3
(2) ヘドロの分類	3
1.2.3 ヘドロの分布	4
1.2.4 ヘドロ問題の現状	5
(1) 河川・湖沼における問題点	5
(2) 港湾における問題点	5
(3) 海域における問題点	5
1.3 超軟弱粘土の処理・対策	6
1.3.1 超軟弱粘土の処理・処分	6
(1) ヘドロの浚渫と埋立	6
(2) ヘドロの脱水・固化	6
1.3.2 超軟弱粘土の安定処理	7
1.4 本研究の内容	8
1.4.1 本研究の目的	8
1.4.2 本研究の全体にわたる研究手法	8
1.4.3 本論文の構成	9
参 考 文 献	10
第 2 章 超軟弱粘土の工学的性質に関する巨視的考察	12
2.1 超軟弱粘土の調査と採取	12
2.1.1 超軟弱粘土の調査	12
2.1.2 超軟弱粘土の採取	13
2.2 超軟弱粘土の組成	14
2.2.1 有機成分	14
2.2.2 無機成分	15
(1) X線回折分析	15

(2) 電子顕微鏡による観察	17
(3) 示差熱分析	20
(4) 赤外線吸収スペクトル分析	20
(5) 化学分析	20
2.2.3 界面成分	21
(1) pH	21
(2) 塩基置換容量と遊離カチオン量	21
2.2.4 まとめ	21
2.3 超軟弱粘土の沈降性状	22
2.3.1 沈降性状を左右する要因	22
2.3.2 沈降における土粒子以外の固体(有機物)の影響	23
(1) 実験の方法	23
(2) 実験の結果と考察	24
(3) 有機物による沈降団粒に関する検討	26
2.3.3 沈降における土粒子の集合・堆積状態	26
(1) 実験の方法	27
(2) 実験の結果と考察	27
(3) 沈降時の粘土粒子間の凝集力と堆積の状態	31
2.3.4 まとめ	32
2.4 超軟弱粘土の力学的性質	33
2.4.1 超軟弱粘土の物理的性質	33
2.4.2 超軟弱粘土の圧密特性	34
(1) 実験の方法	34
(2) 実験の結果と考察	35
2.4.3 超軟弱粘土の強度特性	36
(1) 実験の方法	36
(2) 実験の結果と考察	36
2.4.4 まとめ	37
2.5 結 論	38
参 考 文 献	39
第 3 章 超軟弱粘土の工学的性質に関する微視的考察	41
3.1 土構造の定義とその研究の意義	41
3.1.1 土構造	41

3.1.2	微視的構造の研究の意義	42
3.2	土構造のモデル	43
3.2.1	土構造の用語	43
3.2.2	基本単位	43
3.2.3	基本モデル	44
3.2.4	実体モデル	45
3.3	研究のための手法について	49
3.3.1	研究機器とその適用性	49
3.3.2	試料作成における問題点	51
(1)	分析のための試料のサンプリング過程	51
(2)	試料中の水分の除去過程	52
(3)	分析表面の作成過程	53
3.3.3	用いた試料作成法	55
3.4	微視的構造の観察	56
3.4.1	単一粘土鉱物の微視的構造	56
3.4.2	自然粘性土の微視的構造	60
3.5	工学的性質との関連性	70
3.5.1	定量的表示法	70
(1)	Kozeny-Carmanの式を用いる方法	70
(2)	光学顕微鏡を用いる方法	71
(3)	相対的粒子接触の方法	71
(4)	X線回折による方法	72
(5)	極点図を用いる方法	72
(6)	電子顕微鏡を用いる方法	72
3.5.2	M値による構造表現	73
3.5.3	ベッドによる構造表現	77
(1)	ベッドの頻度分布	77
(2)	ベッドの形成と変形のメカニズム	81
3.5.4	ポアによる構造表現	84
(1)	ポア面積	84
(2)	ポア径	86
(3)	ポア形状	86
3.5.5	初期構造の差と工学的性質との関連	88
(1)	初期構造の変化のための試料条件と調整法	88

(2) 構造の差と圧密・せん断挙動	89
(3) 圧密時のペッドの定方向径比について	90
3.5.6 まとめ	91
3.6 結 論	92
参 考 文 献	94
 第 4 章 土中有機物と土質安定	98
4.1 土中有機物について	98
4.1.1 土中有機物の種類と分類	98
4.1.2 土中微生物の種類と作用	100
(1) 代表的微生物群	100
(2) 微生物の栄養源	101
(3) 生育に及ぼす環境とその影響	101
(4) 生育曲線	102
(5) 微生物の土質工学的作用	102
4.1.3 土中有機物の機能	102
(1) 粘土有機物複合体について	102
(2) 微生物によるペッド化作用	105
4.2 土中腐植による化学的土質安定処理土の工学的性質とその改良のメカニズム ..	105
4.2.1 試料調整法	105
(1) 有機物(腐植酸)の精製法	106
(2) 有機成分処理土の作成方法	106
4.2.2 有機成分処理土の工学的性質	108
(1) 土粒子比重	108
(2) コンシステンシー特性	109
(3) 圧密特性	109
(4) 強度特性	111
4.2.3 有機成分処理土の改良のメカニズム	111
(1) 界面特性	112
(2) 土粒子への吸着のメカニズム	112
(3) 微視的観察	115
4.2.4 まとめ	119
4.3 微生物による生化学的安定処理土の工学的性質とその改良のメカニズム	120
4.3.1 試料調整法	120

(1) 本研究に用いる微生物の選択	120
(2) 微生物処理土の調整法	121
4.3.2 微生物処理土の工学的性質	123
(1) 強度特性	123
(2) 圧密特性	125
(3) 締固め特性	127
(4) コンシステンシー特性	128
4.3.3 微生物処理土の改良のメカニズム	129
(1) 粒度分析	129
(2) 微生物の生成物質の土粒子への吸着	131
(3) 微視的観察	133
4.3.4 まとめ	134
4.4 結 論	137
参 考 文 献	139
 第 5 章 多価カチオンと土質安定	141
5.1 多価カチオンの作用	141
5.1.1 多価カチオンの変化と土中での働き	141
5.1.2 土中での鉄酸化物の出現の仕方	142
5.2 多価カチオンによる化学的安定処理土の工学的性質	144
5.2.1 試料の調整法と試験方法	144
(1) 実験試料の調整	144
(2) 多価カチオンの配合	145
(3) 試験方法	145
5.2.2 鉄処理土の工学的性質	146
(1) コンシステンシー特性	146
(2) 締固め特性	147
(3) 強度特性	148
(4) 圧密特性	149
5.2.3 鉄・アルミニウム処理土の工学的性質	151
(1) 締固め特性	151
(2) 強度特性	151
5.2.4 複合処理土の工学的性質	154

(1) 締固め特性	154
(2) 強度特性	154
5.2.5 まとめ	158
5.3 多価カチオンによる化学的安定処理土の改良のメカニズム	159
5.3.1 改良メカニズムの研究の手法	159
(1) ペッド化の測定方法	159
(2) 酸化性状の測定方法	159
(3) イオン分布の測定方法	159
(4) 微視的構造の観察手法	160
5.3.2 改良メカニズムの検討結果と考察	160
(1) 処理土のペッド化	160
(2) 処理土の酸化性状	163
(3) 処理土のイオン分布	164
(4) 処理土の微視的構造の観察	164
5.3.3 まとめ	170
5.4 結 論	170
参 考 文 献	171
 第 6 章 結 論	 173
 謝 辞	 176

表 の リ ス ト

表 2-1	有機成分の組成
表 2-2	粘土鉱物の相対含有比率
表 2-3	有機成分による層間隔の伸長
表 2-4	化学分析結果
表 2-5	界面のイオン状況
表 2-6	有機成分量の調整試料 (S-1 試料の H_2O_2 処理による)
表 2-7	ヘドロの物理定数
表 3-1	ベッドとポアの定義
表 3-2	土の構造判定のための代表的分析機器の比較
表 3-3	重み係数
表 3-4	ベッド径 D_{50} の変化
表 3-5	無処理試料の e_0 , w_0
表 3-6	D_{50} と V/H
表 4-1	土壌中の微生物の一例
表 4-2	有機成分処理土の条件
表 4-3	含有有機物の総量と抽出による分別 (試料粘土 3 g あたり)
表 4-4	微生物の選択のための実験条件とその結果
表 4-5	微生物処理土の試料条件
表 4-6	微生物処理土の圧縮指数の変化
表 5-1	用いた試料の物理定数
表 5-2	多価カチオンの配合条件
表 5-3	鉄粉添加量と補正比重値

図 の リ ス ト

- 図 1 - 1 土の相軌跡（体積率）
- 図 1 - 2 ヘドロ問題発生地域の分布
- 図 1 - 3 ヘドロの効果的安定処理のための要因
- 図 1 - 4 本論文の構成

- 図 2 - 1 ヘドロ層の測深
- 図 2 - 2 試料採取地点
- 図 2 - 3 ヘドロの赤外線吸収スペクトル分析結果
- 図 2 - 4 ヘドロのX線回折結果
- 図 2 - 5 X線回折図から粘土鉱物の定量への模式図
- 図 2 - 6 ヘドロの示差熱分析曲線
- 図 2 - 7 塩分濃度による沈降・堆積構造の相違
- 図 2 - 8 懸濁液濃度の差に基づく沈降パターンの変化の模式図
- 図 2 - 9 懸濁液の密度分布と沈降曲線
- 図 2 - 10 沈降曲線
- 図 2 - 11 沈降速度
- 図 2 - 12 最終沈積量
- 図 2 - 13 ヘドロ粒子表面へのグリセロール吸着量
- 図 2 - 14 安息角測定容器
- 図 2 - 15 凝集・分散剤による沈降曲線の変化
- 図 2 - 16 凝集・分散剤による沈降速度の変化
- 図 2 - 17 凝集・分散剤による最終間げき比の変化
- 図 2 - 18 最終間げき比と見かけ団粒径
- 図 2 - 19 安息角と添加剤濃度
- 図 2 - 20 安息角と見かけ団粒径
- 図 2 - 21 安息角と堆積高さ
- 図 2 - 22 凝集力と自重の関係
- 図 2 - 23 ヘドロの粒度分布
- 図 2 - 24 ヘドロの堆積深度分布

- 図 2 - 25 ヘドロの粒度構成
- 図 2 - 26 沈降・圧密容器
- 図 2 - 27 超軟弱粘土の $e \sim \log p$ 曲線
- 図 2 - 28 超軟弱粘土の透水性の変化
- 図 2 - 29 超軟弱粘土のベーンせん断強度と鋭敏比

- 図 3 - 1 構造研究の位置づけ
- 図 3 - 2 基本モデル
- 図 3 - 3 粘土サスペンションのモデル
- 図 3 - 4 階段状カードハウス構造
- 図 3 - 5 ブックハウス構造
- 図 3 - 6 多分散構造
- 図 3 - 7 集合のタイプ
- 図 3 - 8 立体構造モデル
- 図 3 - 9 土壌の集合モデル
- 図 3 - 10 ベッド配列モデル
- 図 3 - 11 粗大粒子の表面状況
- 図 3 - 12 ベッドの状態
- 図 3 - 13 試料からえられる情報
- 図 3 - 14 走査型電子顕微鏡の模式図
- 図 3 - 15 サンプリングによる応力履歴
- 図 3 - 16 供試体作成のため K_0 状態からの除荷時の履歴
- 図 3 - 17 凍結乾燥装置（昇華プロセス）の概要
- 図 3 - 18 走査型電子顕微鏡用試料作成手順
- 図 3 - 19 せん断時の $e \sim \sigma'_N$ 関係
- 図 3 - 20 X線回折図の読みとり
- 図 3 - 21 粒子傾斜角 θ_i の読みとり
- 図 3 - 22 粒子傾斜角頻度図
- 図 3 - 23 $M \sim \log p$ 関係
- 図 3 - 24 $\tau \sim e \sim p$ 関係
- 図 3 - 25 $\tau \sim M \sim p$ 関係
- 図 3 - 26 $M, e \sim \log p$ 関係

- 図 3 - 27 電子顕微鏡観察面
- 図 3 - 28 ベッドのトレースの例
- 図 3 - 29 定方向径
- 図 3 - 30 ベッド H - 方向径の頻度図
- 図 3 - 31 ベッド V - 方向径の頻度図
- 図 3 - 32 完全分散状態の粒子径とベッド径の頻度図
- 図 3 - 33 V/H の頻度図
- 図 3 - 34 ベッド D_{50} の V/H の変化
- 図 3 - 35 ベッドの変形メカニズム
- 図 3 - 36 $e_a \sim e$ の相関性
- 図 3 - 37 $e_a \sim \log p$ 関係
- 図 3 - 38 ポア面積と透水係数の関係
- 図 3 - 39 ポア面積の頻度図 (正規圧密状態)
- 図 3 - 40 ポア面積の頻度図 (過圧密状態)
- 図 3 - 41 A_{mean} と A_{50} の変化
- 図 3 - 42 ポア V - 方向径の頻度図 (正規圧密状態)
- 図 3 - 43 ポア V - 方向径の頻度図 (過圧密状態)
- 図 3 - 44 ポア H - 方向径の頻度図 (正規圧密状態)
- 図 3 - 45 ポア H - 方向径の頻度図 (過圧密状態)
- 図 3 - 46 ポア形状の変化
- 図 3 - 47 初期構造の相違に基づく沈下曲線の差
- 図 3 - 48 初期構造の異なる試料の $e \sim \log p$ 関係
- 図 3 - 49 $K_0 S^2 \sim \log \bar{p}$ 関係
- 図 3 - 50 $e \sim \log \tau_f$ 関係
- 図 3 - 51 初期構造の異なる試料のベッド D_{50} の V/H の変化

- 図 4 - 1 生物遺体の腐植化と無機化
- 図 4 - 2 腐植分類法
- 図 4 - 3 微生物の分類
- 図 4 - 4 微生物の生育曲線
- 図 4 - 5 長鎖ポリマー架橋

- 図 4-6 陰イオンと雲母型粘土表面との相互作用
- 図 4-7 陰イオンと含水アルミ酸化物表面の相互作用
- 図 4-8 粘土と有機物の結合タイプ
- 図 4-9 腐植酸の抽出精製法
- 図 4-10 土粒子比重の変化
- 図 4-11 コンシステンシー特性
- 図 4-12 圧縮指数の変化
- 図 4-13 圧密係数の変化
- 図 4-14 透水係数の変化
- 図 4-15 2次圧密特性
- 図 4-16 せん断特性 ($p_0 = 6.4, 3.2 \text{ kg/cm}^2$)
- 図 4-17 せん断特性 ($p_0 = 0.4 \text{ kg/cm}^2$)
- 図 4-18 最大せん断強度の変化
- 図 4-19 c_u/p の変化
- 図 4-20 CEC の変化
- 図 4-21 X線回折にみられる層間隔の変化
- 図 4-22 モンモリロナイトの層間膨潤量
- 図 4-23 有機物の種類による赤外線吸収スペクトル
- 図 4-24 カオリナイトの赤外線吸収スペクトル
- 図 4-25 モンモリロナイトの赤外線吸収スペクトル
- 図 4-26 カオリナイトの示差熱分析曲線
- 図 4-27 モンモリロナイトの示差熱分析曲線
- 図 4-28 処理土中の粘土鉱物のX線回折図における変化
- 図 4-29 処理土の赤外線吸収スペクトル
- 図 4-30 処理土の示差熱分析曲線
- 図 4-31 微生物処理土中の生菌数の変化
- 図 4-32 大阪南港粘土試料の q_u の変化 (2週間培養)
- 図 4-33 O-4 試料の q_u の変化
- 図 4-34 大阪南港粘土試料のコーン貫入量の変化
- 図 4-35 カオリナイト試料のコーン貫入量の変化
- 図 4-36 モンモリロナイト試料のコーン貫入量の変化

- 図 4 - 37 圧密係数の変化
- 図 4 - 38 透水係数の変化
- 図 4 - 39 大阪南港粘土試料の締固め曲線と q_u
- 図 4 - 40 カオリナイト試料の締固め曲線と q_u
- 図 4 - 41 モンモリロナイト試料の締固め曲線と q_u
- 図 4 - 42 コンシステンシー特性
- 図 4 - 43 大阪南港粘土試料の粒度分布（1 週間培養）
- 図 4 - 44 O - 4 試料の粒度分布
- 図 4 - 45 カオリナイト試料の粒度分布
- 図 4 - 46 モンモリロナイト試料の粒度分布
- 図 4 - 47 生成物質の吸着量曲線
- 図 4 - 48 グルコースの吸着量曲線
- 図 4 - 49 モンモリロナイトの層間への吸着

- 図 5 - 1 Pourbaix 図表
- 図 5 - 2 鉄の腐食の機構
- 図 5 - 3 鉄酸化物の出現形態
- 図 5 - 4 鉄処理土（シール養生）のコンシステンシー特性
- 図 5 - 5 鉄処理土（気乾養生）のコンシステンシー特性
- 図 5 - 6 締固め特性
- 図 5 - 7 q_u の変化
- 図 5 - 8 q_u と含水比の関係
- 図 5 - 9 圧縮特性
- 図 5 - 10 処理による沈下性状の変化の模式図
- 図 5 - 11 2 次圧密特性
- 図 5 - 12 鉄・アルミニウム処理土の締固め特性
- 図 5 - 13 気乾養生試料の q_u ($w_i = 30 \%$)
- 図 5 - 14 気乾養生試料の含水比 ($w_i = 30 \%$)
- 図 5 - 15 シール養生試料の q_u ($w_i = 30 \%$)
- 図 5 - 16 シール養生試料の含水比 ($w_i = 30 \%$)
- 図 5 - 17 気乾養生試料の q_u ($w_i = 20 \%$)

- 図 5 - 18 気乾養生試料の含水比 ($w_i = 20 \%$)
- 図 5 - 19 シール養生試料の q_u ($w_i = 20 \%$)
- 図 5 - 20 シール養生試料の含水比 ($w_i = 20 \%$)
- 図 5 - 21 q_u と含水比 (シール養生, $w_i = 30 \%$)
- 図 5 - 22 q_u と含水比 (気乾養生, $w_i = 30 \%$)
- 図 5 - 23 ベーセンせん断強度
- 図 5 - 24 処理による含水比の変化
- 図 5 - 25 複合処理土の締固め特性
- 図 5 - 26 複合処理土 B - 系統の q_u (シール養生)
- 図 5 - 27 複合処理土 C - 系統の q_u (シール養生)
- 図 5 - 28 複合処理土 D - 系統の q_u (シール養生)
- 図 5 - 29 q_u と含水比の関係
- 図 5 - 30 $\tau_f \sim q_c$ 関係
- 図 5 - 31 $\tau_f \sim w$ 関係
- 図 5 - 32 鉄処理土の粒度分布
- 図 5 - 33 鉄・アルミウム処理土の粒度分布
- 図 5 - 34 複合処理土の粒度分布
- 図 5 - 35 鉄イオン, アルミニウムイオンによるベッドの仮想図
- 図 5 - 36 鉄・アルミニウム処理土の比表面積の変化
- 図 5 - 37 比表面積とせん断強度との関係
- 図 5 - 38 鉄イオンの酸化性状
- 図 5 - 39 Eh と pH の変化状況
- 図 5 - 40 土層内での鉄イオンの分布

写 真 の リ ス ト

写真 2.1	カオリナイトとハロイサイト
写真 2.2	ハロイサイト
写真 2.3	カオリナイトとモンモリロナイト
写真 2.4	カオリナイト
写真 2.5	写真 2.4 の電子回折像
写真 2.6	ケイソウ土
写真 2.7	ケイソウ土
写真 2.8	安息角の測定, PAF の場合 (500 ppm)
写真 2.9	安息角の測定, PAC の場合 (500 ppm)
写真 2.10	安息角の測定, HM の場合 (500 ppm)
写真 2.11	安息角の測定, PN の場合 (500 ppm)
写真 3.1	ピーリング前の試料表面 (大阪南港粘土) ×500
写真 3.2	ピーリング後の構造の現出 (大阪南港粘土) ×5000
写真 3.3	導電性接着材の状態 ×2000
写真 3.4	カオリナイト, 圧密 H - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
写真 3.5	カオリナイト, 圧密 H - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.6	カオリナイト, 圧密 V - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
写真 3.7	カオリナイト, 圧密 V - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.8	カオリン粘土, 圧密 V - 断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.9	カオリン粘土, 圧密 V - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.10	モンモリロナイト, 圧密 H - 断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.11	モンモリロナイト, 圧密 V - 断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.12	モンモリロナイト, 圧密 H - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.13	モンモリロナイト, 圧密 V - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.14	大阪ヘドロ, 圧密 H - 断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.15	大阪ヘドロ, 圧密 V - 断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
写真 3.16	大阪ヘドロ, 圧密 H - 断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

- 写真 3.17 大阪ヘドロ，圧密 V－断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
- 写真 3.18 大阪南港粘土，圧密 V－断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
- 写真 3.19 大阪南港粘土，圧密 V－断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
- 写真 3.20 大阪南港粘土のステレオ写真，圧密 H－断面 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 3000$
- 写真 3.21 大阪南港粘土のステレオ写真，圧密 V－断面 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 3000$
- 写真 3.22 ボール状物質の配列，圧密 H－断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 1400$
- 写真 3.23 ボール状物質の配列，圧密 V－断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 1400$
- 写真 3.24 大阪南港粘土の単純せん断，V－断面 $\sigma_N = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 3.25 大阪南港粘土の単純せん断，V－断面 $\sigma_N = 0.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 3.26 大阪南港粘土の単純せん断，V－断面 $\sigma_N = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 3.27 大阪南港粘土の単純せん断，V－断面 $\sigma_N = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 3.28 立方体物質（石英） $\times 2000$
- 写真 3.29 風化単一粒子（石英） $\times 20000$
- 写真 3.30 風化単一粒子（長石） $\times 7000$
- 写真 3.31 雲 母 $\times 2000$
- 写真 3.32 ケイソウ土 $\times 2000$
- 写真 3.33 ケイソウ土 $\times 1000$
- 写真 3.34 ケイソウ土 $\times 5000$
- 写真 3.35 有 孔 虫 $\times 500$
- 写真 3.36 放 散 虫 $\times 2000$
- 写真 3.37 パイライト $\times 3500$
- 写真 3.38 パイライト $\times 10000$
- 写真 3.39 ペットの観察，自然沈降堆積時 V－断面 $\times 500$
- 写真 3.40 ペットの観察，圧密 V－断面 $p = 0.5 \text{ kg/cm}^2 \times 500$
- 写真 3.41 ペットの観察，圧密 V－断面 $p = 1.0 \text{ kg/cm}^2 \times 500$
- 写真 3.42 ペットの観察，圧密 V－断面 $p = 4.0 \text{ kg/cm}^2 \times 500$
- 写真 3.43 ペットの観察，圧密 V－断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 500$
- 写真 4.1 気乾腐植酸表面（乾燥収縮によるわれ目） $\times 2000$
- 写真 4.2 気乾腐植酸破断面（葉脈状の組織） $\times 5000$
- 写真 4.3 気乾腐植酸破断面（霜柱状の組織） $\times 2000$

- 写真 4.4 有機成分処理土 N-6 の圧密 H-断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 1000$
- 写真 4.5 有機成分処理土 N-6 の圧密 H-断面 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$
- 写真 4.6 有機成分処理土 N-6 の圧密 V-断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 1000$
- 写真 4.7 有機成分処理土 N-6 の圧密 V-断面 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 1000$
- 写真 4.8 有機成分処理土 N-6 の一面せん断 H-断面 $p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 4.9 有機成分処理土 N-6 の一面せん断 V-断面 $p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 4.10 有機成分処理土 N-4 の一面せん断 H-断面 $p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 4.11 有機成分処理土 N-4 の一面せん断 V-断面 $p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$
- 写真 4.12 微生物未処理土の分散状態（大阪南港粘土） $\times 150$
- 写真 4.13 微生物処理土のベッド化状態（大阪南港粘土） $\times 150$
- 写真 4.14 微生物処理土のベッド化状態（大阪南港粘土） $\times 150$
- 写真 4.15 微生物処理土のベッド化状態（大阪南港粘土） $\times 300$
- 写真 4.16 微生物未処理土の分散状態（モンモリロナイト） $\times 300$
- 写真 4.17 微生物処理土のベッド化状態（モンモリロナイト） $\times 300$
- 写真 4.18 微生物処理土のベッド化状態（モンモリロナイト） $\times 300$
- 写真 5.1 鉄未処理土（I-1）中の鉄イオンの分布 Fe-K α 図 $\times 500$
- 写真 5.2 鉄処理土（I-6）中の鉄イオンの分布 Fe-K α 図 $\times 500$
- 写真 5.3 処理土中の酸化鉄結晶 $\times 2000$
- 写真 5.4 処理土中の酸化鉄結晶 $\times 2000$
- 写真 5.5 処理土中の酸化鉄結晶 $\times 2000$
- 写真 5.6 処理土中の酸化鉄結晶 $\times 2000$
- 写真 5.7 I-3 試料の圧密 V-断面 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2$ 、中央に鉄酸化物 $\times 5000$
- 写真 5.8 I-3 試料の 1 軸圧縮すべり面 $\times 2000$
- 写真 5.9 I-6 試料の 1 軸圧縮すべり面 $\times 1000$
- 写真 5.10 I-6 試料の圧密 H-断面 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 1000$
- 写真 5.11 I-6 試料の圧密 H-断面 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

第 1 章 序 論

1.1 研究の背景

環境汚染に関する社会的な反響が先鋭化し、海岸や港湾地域におけるヘドロ公害がクローズアップされるようになって10年余が経過した。¹⁾ 騒音・振動・汚染が公害の3主因であるが、このような問題自体は産業・経済の高度成長と社会・生活環境整備との間の不調和の産物にはかならない。ヘドロ公害もまさしくこの例にもれないものであるが、当初はきわめて限られた地域での公害問題であった。すなわち、大阪・神戸港をはじめとした東京・名古屋などの主要港湾航路上に微細物質の層状の堆積がみられ（浮泥と呼んだ）、これが浚渫工事に障害となり、航路浚渫時において水深の増加が期待できないだけでなく、逆に水深の減少を生じ港湾機能上大きな問題となったこと、²⁾ ならびに産業廃棄物の集積によるヘドロ化として、田子の浦や川之江に象徴されるパルプ廃液ヘドロの堆積によって、魚貝類の死滅・悪臭の発生などとして問題となったことなどであった。ところが、近年ではヘドロの堆積は日本各地にひろがり、それぞれの問題が海域全体にまで拡散しており、例えば1つの湾内すべてを処理しなければならない事態にさえ至っている。環境浄化の問題として国全体でその対策に取り組む必要に迫られているといえるであろう。

また別のみかたをすれば、このような環境汚染の発生は自然界における目浄作用を無視して、生態系を大規模に攪乱したことによって生じたものとみることができる。ヘドロ対策として土質工学的な処理を講じる場合においても、今後はこのような自然の生態系に特異な変化を与えず、その作用に立脚した対策を考究することが必要である。

ところで、現在は産業・経済の安定成長期にある。しかしながら国民経済レベルを維持してゆくためには、臨海性産業を特徴とせざるをえないわが国において、今後とも埋立による産業立地を必然的に要求されるものである。埋立事業は海域汚染の源の1つと目されて、工事着手にもきわめて慎重な配慮を要しているが、これは逆にヘドロのような超軟弱粘土の処理として有力な手法でもある。関西新空港の建設は大阪湾内泉北沖に設置が決定されており、現在埋立工法によるか浮体工法によるかの議論が盛んである。著者の立場では、埋立によることこそが本来の姿であると考えられるか、このとき海底に存在するヘドロの処理、さらには5億 m^3 とされる莫大な埋立用土の必要性からヘドロのような超軟弱粘土をも安定処理して、埋立用土として利用することが要望される。環境保全の立場からヘドロのような底質浄化対策の確立をも含めて、超軟弱粘土の材料学的な究明とその合理的な土質安定処理工法の開発は緊急の課題といえるだろう。

1.2 超軟弱粘土とその問題点

1.2.1 超軟弱粘土の定義

まずはじめに、本研究で取り扱う超軟弱粘土の範囲ならびに定義をあらかじめ定義しておきたい。元来、超軟弱粘土とは曖昧な術語であり、土質工学会に昭和48年から52年まで設置された超軟弱地盤研究委員会においても種々議論され、「超」という言葉の意味は軟弱の程度がきわめてはなはだしい状態をさすものとして次のように定義されている。³⁾

超軟弱粘土とは、北欧やカナダのクイックレーのように海成粘土のリーチング作用による粒子界面特性の変化をうけている本質的な鋭敏粘土と、これとは別に粘性土一般であって、ある状態、すなわちきわめて水分の多い状態、例えば沈降堆積、浚渫時や攪乱などによってもたらされた超軟弱化した粘性土をさす。そして液性指数が100以上になるような粘性土が概当する。

よって、わが国における超軟弱粘土では、きわめて軟弱な状態のものとして、ヘドロ（一部に産業廃棄物や有害物質を含有するものをも含めて）がその代表としてあげられる。また超軟弱粘土は、時代の推移による自重圧密や人為的作用にもとづく圧密・脱水の進行によって、それは冲積粘土と称される堆積粘土層へと移行するものである。

ところで、土の構成

相の体積率を面積座標で

表わしたものととして図1

ー1が知られている。⁴⁾

図は横軸が液相の体積率、

縦軸が固相の体積率、気

相の体積率は1.0から縦

・横軸値をさしひいたも

のである。横軸1.0は完

全な液体のみ、縦軸1.0

は完全な固体のみを表わ

している。図中の曲線は

泥水から乾燥土に至る状

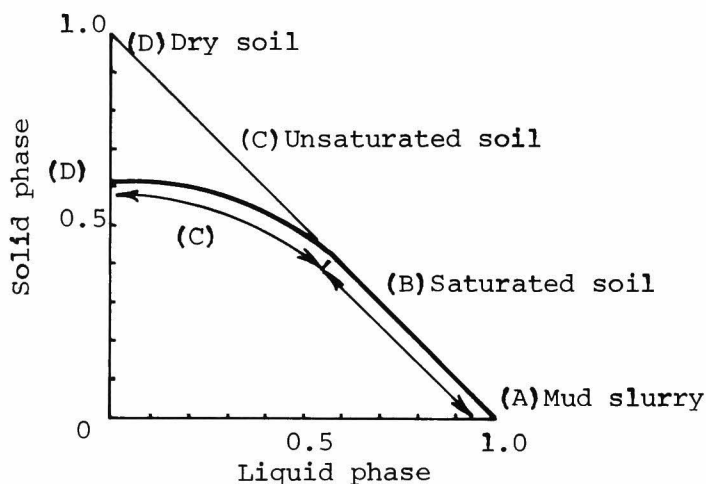


図1ー1 土の相軌跡（体積率）

態を表現しており、泥水(A)→飽和土(B)→不飽和土(C)→乾燥土(D)といった変化が示される。ここで取り扱う超軟弱粘土は、その状態量としての意味を広義に解釈して、(A)付近の泥水状態を中心にするものの(A)ー(B)までの領域を含めるものとする。

次項では、超軟弱粘土の代表とみなされるヘドロについて概観し、関連する問題点をあらかじめ整理しておきたい。

1.2.2 ヘドロの定義と分類

(1) ヘドロの定義

超軟弱粘土の代表として考えられるヘドロについても語源、決定ともに明確なものがないため、ここで次のように定義しておきたい。著者はこれまで土質工学的な立場からヘドロを取り扱ってきたが、各地域によってその内容も変化に富んでいるものの「自然的ならびに人工的要因によって発生した微細粒子が、水底表層上に浮遊堆積したもの」をヘドロと称することが可能である。⁵⁾

(2) ヘドロの分類

このようなヘドロも、その着目する立場によって次のように分類される。⁶⁾

(i) 状態的分类⁷⁾

a) 浮遊ヘドロ……水中に浮遊し流動する状態にあるヘドロであって、わずかの流速（密度流を含む）で容易にその位置をかえる。

b) 定着ヘドロ……ヘドロの堆積によって自重圧密進行状態にあるヘドロ、沈泥とか堆積ヘドロとも称しうるものである。

(ii) 発生位置的分类⁸⁾

a) 海域ヘドロ……主体は一般に粘土鉱物からなっており、海水という高いイオン濃度溶液中において凝集沈降をきたすものである。その成因として河川からの土砂の流入、海域における浚渫あるいは埋立作業に伴う微細粒子の発生・浮遊などが考えられ、その原位置の地質条件にも左右される。さらに沿岸ならびに河川から、あるいは船舶からの人工有害物質が付加されることもあり、各海域ヘドロの特殊性を形成している。

b) 淡水域ヘドロ……河川・湖沼・貯水池などにみられるものであって、その流域の地質条件を母岩とした粘土鉱物、ならびに主として藻類に基づく有機物を含有している。

c) 産業廃棄物……人為的な作用によって公共水域へ放出拡散した廃棄物がヘドロ化するものであり、成分は発生源に依存している。

d) 建設工事排泥……最近都市内で施工例の多い泥水工法に伴うベントナイト泥水、山砂利採取に伴う洗浄ヘドロなどのいわゆる陸ヘドロである。通常有害物質を含有しないものでシルト・粘土分のみの場合を考慮すればよいことになる。

(iii) 有害物質による分類

a) 有害物質を含まないヘドロ……主として粘土鉱物からなるもの。

b) 重金属などを含むヘドロ……水銀などを含むもの。

c) 有機物・繊維質を含むヘドロ……パルプ排液などからなるもの。

d) 油分を含むヘドロ……いわゆる含油ヘドロ。

e) その他（放射性物質など）を含むヘドロ

これらは有害物質の種類と量によってその処理対策を必要とされるものである。

1.2.3 ヘドロの分布

産業廃棄物との関連をも含めて日本周辺海域でヘドロ問題をかかえる地域を示すと図1-2のようになる。⁵⁾ 図中の番号はつぎの地域を表わしたものである。

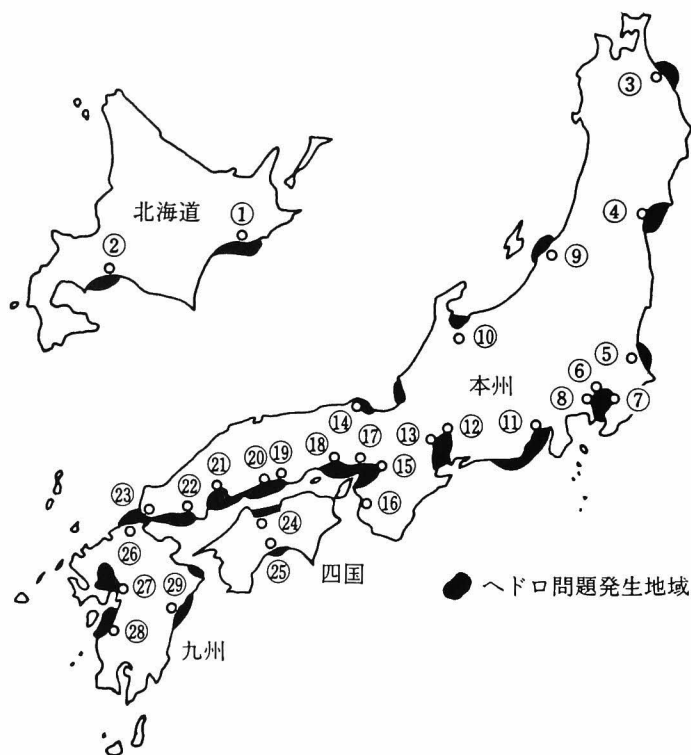
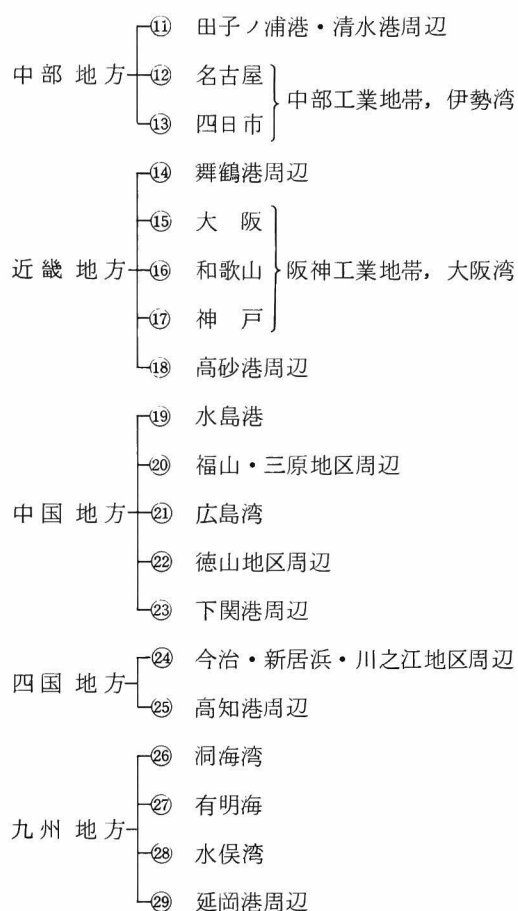


図1-2 ヘドロ問題発生地域の分布

- | | | | |
|-------|---|---------|--------------|
| 北海道地方 | ① | 釧路港周辺 | |
| | ② | 苫小牧地区周辺 | |
| 東北地方 | ③ | 八戸港周辺 | |
| | ④ | 仙台湾 | |
| 関東地方 | ⑤ | 鹿島港周辺 | } 京浜工業地帯，東京湾 |
| | ⑥ | 東京 | |
| | ⑦ | 千葉 | |
| | ⑧ | 横浜 | |
| 北陸地方 | ⑨ | 新潟港周辺 | |
| | ⑩ | 富山湾 | |



1.2.4 ヘドロ問題の現状

このように、河川・湖沼や港湾、海域などに浮遊・堆積したヘドロは、人為的な作用によって発生・排出された諸物質をも含めて、水域の汚染源として大きな社会問題、環境問題となっている。ヘドロ問題について今日の状況をとりまとめると以下ようになる。⁶⁾

(1) 河川・湖沼における問題点

- ・流入汚濁負荷量の軽減・富栄養化の防止
- ・ヘドロの浚渫除去
- ・浄化用水の導入による回生

(2) 港湾における問題点

- ・港湾機能維持のための浚渫対策
- ・港湾環境の整備，海浜の生態環境の保護（干潟の造成など）

(3) 海域における問題点

- 底質汚濁の改善，堆積したヘドロの浚渫，埋立
- 赤潮防止対策
- 汚染海域の浄化

これらの問題点を土質工学的な見地から整理すると，その中心テーマはヘドロの無公害浚渫除去，埋立ならびに安定処理ということに帰結するものである。さらに，その原点としてのヘドロの組成，特性の解明が必須のものであることは言をまたない。これまで，ややもするとヘドロの安定処理が当面の課題だということで，ヘドロの基本的な物性や，浮遊沈降のメカニズム等の把握は等閑視されてきた。本研究はこのような原点に戻って安定処理への総合的な展開をはかることをめざしている。

1.3 超軟弱粘土の処理・対策

前節で述べたヘドロのような超軟弱粘土の問題点の解決のためには，このような超軟弱粘土層の処理・処分が必要である。処理として，除去のための浚渫，埋立，脱水固化などの対策が講じられており，これら対策等に付随する2次汚染の防止のために種々の配慮がはらわれている。これら各プロセスは主として処分に力点を置いたものであるが，このような超軟弱粘土であってもいわゆる土質安定処理を施すことによって，埋立用土としてなどの応用の可能性があり，これがとりまなおさず本研究の目的ともなっている。

1.3.1 超軟弱粘土の処理・処分

(1) ヘドロの浚渫と埋立

ヘドロのような超軟弱粘土の除去のための浚渫時に留意すべき事項として，まず水底に堆積したものを揚泥するのであるから，工事中の拡散によって周囲の環境に2次汚染を引き起こさないようにしなければならない。さらに除去すべきヘドロは完全に取り去る必要がある。このような目的のために，対象としたヘドロのみを高含泥率の状態で連続した浚渫を行いうるよう研究開発がなされつつある。

環境浄化のために，浚渫されたヘドロの処分として無害な場所への埋立が用いられるが，ここでも埋立地での余水処理など2次汚染の防止が問題であり，さらに埋立土量と処分地容量との関連性が重要な課題である。

(2) ヘドロの脱水固化

ヘドロに共通する特性は，それがきわめて高含水比であるということにある。さらにヘドロは各種の有害物質を含んでいるため，固化体の溶出性の防止が重要な課題となっている。ヘドロの脱水固化処理に際しては，この高含水比であるということのみでなく，ヘドロの構成粘土鉱物，

有機物などの種類と量などが関与しており、これら成分に着目した処理方法の開発を要している。処理に際しての要因をとりまとめると図1-3のようになる。さらに安定処理にあたって、添加材料の検討と、目的にあった処理方法、例えば原位置固化であるとか、移動固化であるとかの種別ならびに処分地の確保などが求められる。

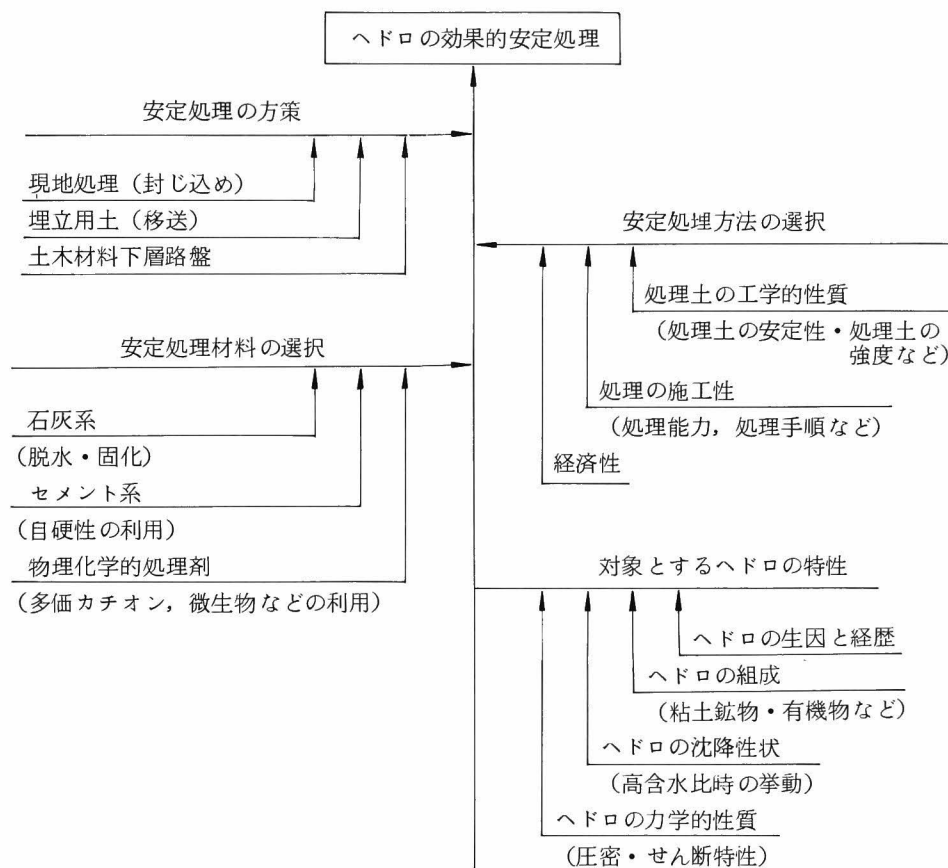


図1-3 ヘドロの効果的安定処理のための要因

1.3.2 超軟弱粘土の安定処理

ヘドロのような超軟弱粘土の安定処理としては、これまで主としてセメント・石灰系の固化処理が用いられている。

広義の超軟弱粘土の安定処理をその原理から整理すると、

- 脱水による高密度化
- 土粒子間の接着による強度の増加

の2つに大別される。またその手法には、物理的に安定処理する場合と、化学的あるいは生化学

的な要素を加味して安定処理する場合とが考えられる。近年では粘性土の本質的な改良方策として化学的な手法の導入がはかられている。ヘドロの安定固化処理として多用されつつあるセメント・石灰固化処理は、狭い領域において大量の固化材の投入によって強制固化をはかっている。このような手法はプラント的な処分として、あるいは限られた範囲の現位置封じ込めとしての効果は大きい。が、大規模でかつ面的な広がりをもつ領域の安定処理としては必ずしも有効とはいえないものである。そこで本研究では、このような場合の安定処理方策として物理化学的処理剤（土中有機物や多価カチオン）を用いた新しい安定処理の可能性を示すものである。

1.4 本研究の内容

1.4.1 本研究の目的

本研究は、すでにふれたように物理化学的及び生化学的作用力下での超軟弱粘土の土質安定処理を対象としている。これまでにも超軟弱粘土の安定処理については多種多様なアプローチがなされているが、それらはきわめてランダムな取り組み方をされているのみである。プラント的な機械脱水手法なども用いられつつあるが、莫大な土量の超軟弱粘土を処理しきことは到底不可能である。そこで、ここでは超軟弱粘土の基本的な作用をあらかじめ明らかにした後、系統立った反応機構の解析をも含めて安定処理を追求したものである。すなわち、超軟弱粘土の工学的性質の解明、及びそれらの知見をもとにした安定処理工法の確立をめざすものであり、このようなオーソドックスな手法によることこそが超軟弱粘土をとりまく問題点解決の道であると考えられる。

1.4.2 本研究の全体にわたる研究手法

安定処理という研究の必然から実験的な解明によらざるをえない。ここで本研究の全体にわたる研究の方法として、用いた試料ならびに基本的実験手法を明らかにしておきたい。

本研究に用いた試料は、超軟弱粘土として大阪ヘドロ（第2章2.1に示す）を中心にしたものであって、これを用いて物性の追求を行っている。さらに安定処理においては、試料量が相当多くなるため、量的制約のあった大阪ヘドロを使用することかできず、超軟弱粘土を広義に解釈して、大阪南港粘土（大阪湾沖積粘土）を用いて処理土の工学的性質の変化、強度発現のメカニズムの追求などを行うこととした。また多価カチオン処理では一部に大阪姫島粘土（同様に大阪湾沖積粘土）を用いた。

粘性土の物理化学的性質の解明のためには、構成粘土鉱物の影響もまた大きい要因の1つである。そこで、機構的・原理的な研究において、単一粘土鉱物の挙動の把握が重要であるため、不活性粘土鉱物の代表としてカオリナイト（主に商品名：クラウンクレーを用いる）と活性粘土鉱物の代表としてモンモリロナイト（工業用ベントナイトを用いる）を選び、実験に供したものである。

実験中、試料は湿潤状態を保持することに充分留意し、乾燥過程が入ることによる粘土粒子表面特性の変化を極力避けるようにつとめている。また、反応性に関する基礎的情報をえるための実験として、空気乾燥試料による締固め試験を行って、1軸圧縮強度の変化として示している。これは主として第5章の多価カチオン処理土において採用したものである。

物理化学的な特性としては、本研究の中心命題である粘土粒子のベッド(団粒)化機構を明らかにすべく、機器分析、主として電子顕微鏡、X線回折などによって検討するものである。

1.4.3 本論文の構成

序論を締めくくるにあたって、ここに第1章から第6章にいたる本論文の論述の過程を明らかにして、著者の論旨があらかじめ理解されやすいようにつとめた。なお本論文の構成を流れ図に示したものが図1-4である。図中の数値は検討している章・節名を表わしている。

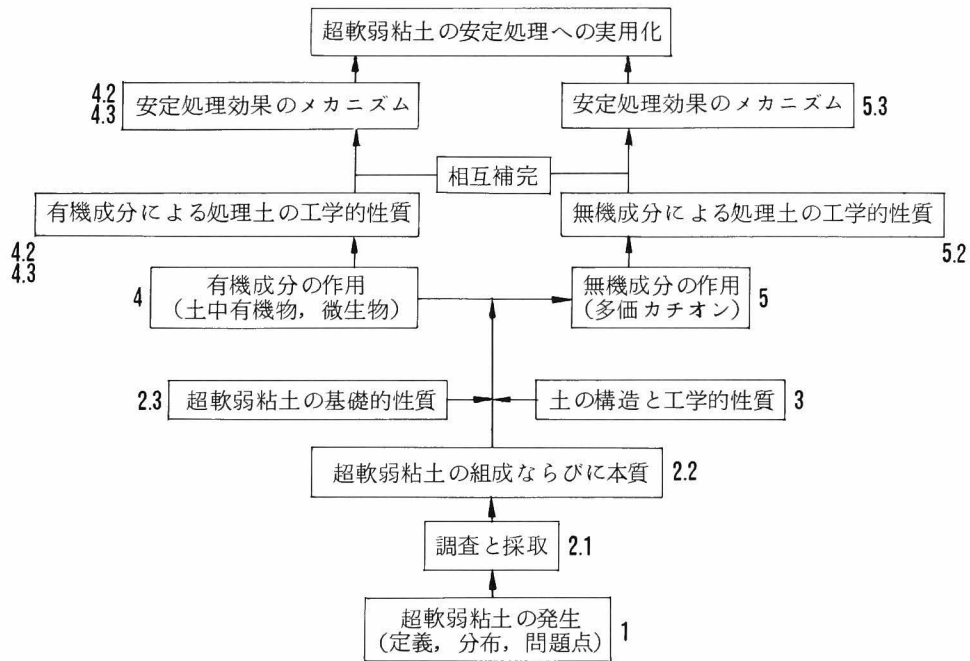


図1-4 本論文の構成

まず第1章においては、超軟弱粘土研究のための工学的背景を明らかにして、取り扱う超軟弱粘土の定義・分類を示し、超軟弱粘土をめぐる問題点を整理した。さらに、これら問題点解決のための方策として、これまでに用いられている安定処理方法の概略を論じ、本研究における物理化学的手法に基づく安定処理の必要性を述べている。

第2章では、超軟弱粘土の代表とされるヘドロの組成分析を行って、その本質ならびに基礎的

性質の知見をえる。特に有機成分が重要なかわり合いをもつことに着目して、沈降性状や力学的性質の検討を経て、粘土粒子が有機物の作用によって団粒として挙動していることなどを明らかにしている。

そこで第3章では、粘土粒子の団粒によって形成される土の構造について考察し、団粒内部の粘土粒子の配列及び団粒形状の変化を取り扱い、工学的な作用力の下でそれがどのように変形してゆくかを明らかにする。

一方第4章では、超軟弱粘土中の有機成分を取り上げてその種類と量とについて検討し、工学的性質に及ぼす影響を考察する。特に強度特性における大きな増大効果に着目して、この作用を促進し超軟弱粘土の安定処理への展開をめざすため、微生物による物性改良の影響について検討するものである。一般微生物種が粘性土の改良に最も効果があり、栄養源の種類と量との調整によって優先的に微生物が生育するための条件を定めることができ、微生物の代謝生成物質が粘土粒子を団粒させ安定処理効果を高めることなどを明らかにしている。

さらに、超軟弱粘土中には有機成分のみでなく非晶質である無機成分の存在もみられる。このような無機成分の代表としては、鉄やアルミニウムの酸化物が考えられ、この酸化物が粘土粒子間に接着作用をもたらすならば、微細粒子の団粒化物質としてきわめて有効である。よって第5章では、多価カチオンの安定処理効果について検討を行っている。主として鉄イオンの酸化に伴う接着（セメンテーション）作用について追求し、強度発現のメカニズムの重要な1つとして鉄イオン酸化物による粘土粒子の団粒化を示すものである。さらに他の多価カチオンとしてアルミニウムイオンや、さきに取り上げた有機物との相乗効果についても検討し、総合的にも効果がみられることを明らかにしている。

最後に第6章として、本研究の成果を総括して、今後の問題点・展望等を示している。

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎，嘉門雅史：物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について，土木学会論文報告集，第209号，1973，pp.103～113.
- 2) 運輸省第三港湾建設局編：浚渫施工に関する技術的対策（浮泥問題），第18回直轄港湾技術研究会，1967．pp.1～39.
- 3) 松尾新一郎：研究委員会活動の総括と展望，超軟弱地盤に関するシンポジウム発表論文集，1977，pp.1～6.
- 4) 例えば嘉門雅史，中沢重一：超軟弱地盤改良への二・三の試み，超軟弱地盤に関するシンポジウム発表論文集，1977，pp.99～102.

- 5) 嘉門雅史：ヘドロの工学的性質について，土と基礎，26巻，1号，1978， pp.19～24.
- 6) 松尾新一郎：ヘドロ問題の処理・対策，土と基礎，26巻，1号，1978， pp.7～12.
- 7) 飯田主税：タイ積汚泥のシュンセツと処理，土と基礎，23巻，8号，1975， pp.61～66.
- 8) 木次恭一，小関征三：ヘドロの固化処理に関する材料及び技術について，工業用水，207号，1975， pp.26～45.

第2章 超軟弱粘土の工学的性質に関する巨視的考察

本章では、超軟弱粘土を代表するものの1つとしてヘドロをとらえ、その組成と工学的性質を明らかにしたものである。

2.1 超軟弱粘土の調査と採取

第1章で示したように、ヘドロは超軟弱粘土の代表とみなされるものであるが、その組成の究明の前段階としてヘドロ層の調査と採取について述べておきたい。

2.1.1 超軟弱粘土の調査

ヘドロ層の測定や層厚の把握は、測定技術の問題ならびにヘドロ層の定義と関連しており、きわめて難しい問題の1つである。

海域における測深には重錘による測深と、音波による測深とが用いられている。重錘には形状と重量とを異にする各種がみられ、また音波による測深でも用いる周波数に種々のものがある。重錘と音波とによる測深には差があるのが普通であり、模式的に示すと図2-1のようになる。¹⁾

音波測深時の周波数の違いによる水深を明らかにしているが、低い周波数はほど高い含泥率からの反射を示すことがわかる。海上保安庁水路部での測定周波数 200 KHz は、密度の違う流体の境界面を示しており、これより下をヘドロ層とみなされる。さらに重錘の停止点、周波数にして 50 ~ 20 KHz の点において支持力がみられる。図中の支持力値は、その点で停止した重錘の水中重量を断面積で除したものである。この支持力発生点以深から重錘停止点（これは重錘重量によって異なるので、あいまいな定義にならざるをえないが）を堆積層（定着ヘドロ）とみなし、この両者

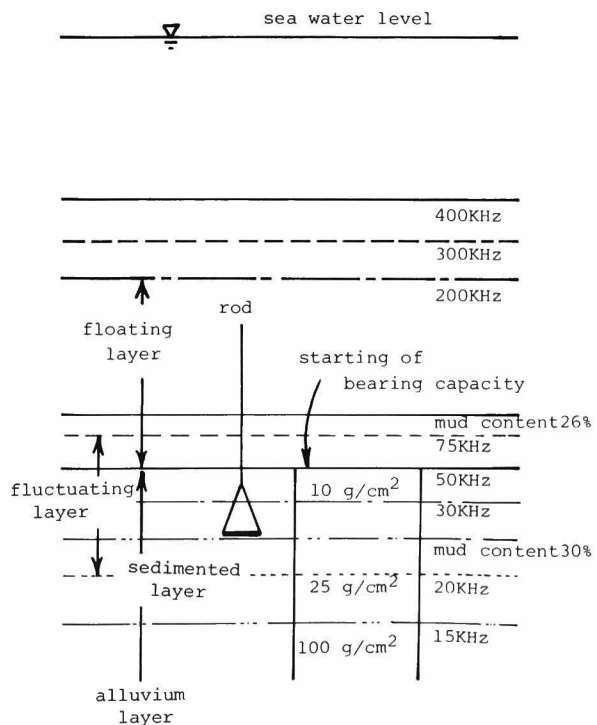


図2-1 ヘドロ層の測深

の間が浮遊層（浮遊ヘドロ）となる。浮遊層は数cmの流速でさえ移動するものである。ヘドロ層の堆積速度は、東京湾、大阪湾のデータで2～3cm/年という例がみられ、層厚の平均値は30～50cm程度である。²⁾ しかしながら、閉鎖海域のような湾内全域ともなれば莫大な量に達し（東京湾では4億tといわれている）、さらに地形要因から潮流残査流や環流のあるところでは集積が生じるため、処理対策の主対象とならざるをえない。

2.1.2 超軟弱粘土の採取

超軟弱粘土の採取にあたっては、2.1.1の手法で確認されたヘドロ層の堆積状態をそのまま保持して、すなわち乱さない状態で行うことが望ましい。このためのサンプラーとしては、現在主として運輸省港湾技術研究所などで研究開発された底部蓋式のものが用いられている。³⁾ また2重管構造による凍結固化採取方式なども採用されつつある。ところが、これら採取試料も、採取後実験室までの運搬及び実験準備において不攪乱状態を保持することはきわめて難しい。

そこで本研究では不攪乱試料の採取については一応断念し、ヘドロ層からの採取のみに重点を置いて次のような方式によったものを試料とした。すなわち、2.1.1の方法でヘドロ層を測定し、その地点に潜水夫がもぐり、ヘドロ層の中間（浮遊層は20～40cm）にサクションポンプを固定して吸引によって採取した。⁴⁾ 採取したヘドロは大阪府堺港航路上に浮遊・堆積した物質である。⁵⁾ このヘドロの発生源としての人工的要因、すなわち工場排水等中の汚染物質については特定のものがなくて、単に周辺港湾の航路浚渫などのための海底掘削や埋立事業に伴う流出微細粒子（これは近年きわめて少なくおさえられているが）、ならびに自然的要因である大和川からの土砂の流入などの占める割合が大きいものである。試料の採取地点を図2-2に示す。最も河口のをS1、沖合のものをS4というように試料番号をつけている。

さらに図中には第3章の微視的考察、第4、5章の土質安定処理への展開のために用いた軟弱粘土（大阪南港粘土、大阪姫島粘土）の採取地点をもあわせて示している。これらは大阪沖積粘土に

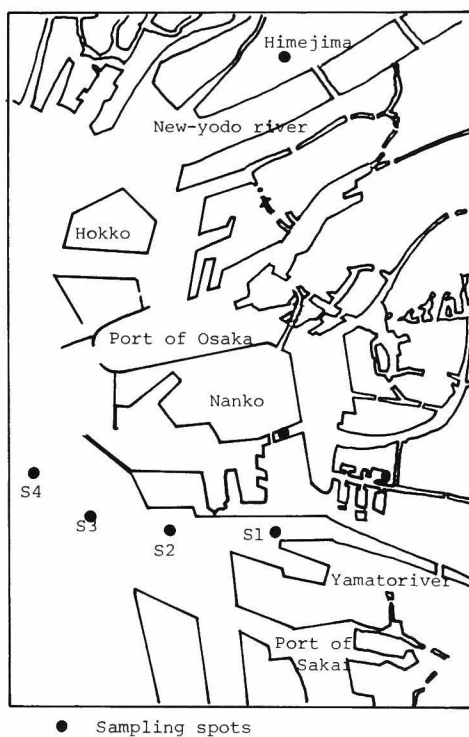


図2-2 試料採取地点

属している。

2.2 超軟弱粘土の組成

まずはじめに、用いたヘドロの組成分析として有機成分、無機成分ならびに界面成分についての検討の結果を述べる。

2.2.1 有機成分

ヘドロは海水中に存在するものであるから、未分解の粗大有機物、粒子に吸着されていると予想される腐植などをはじめ、貝殻中の炭酸塩や残存塩化物、硫化物の含有が考えられる。ヘドロの組成分析としてまずはじめに有機成分の含有量を示す。結果は表 2-1 のとおりである。含有

表 2-1 有機成分の組成

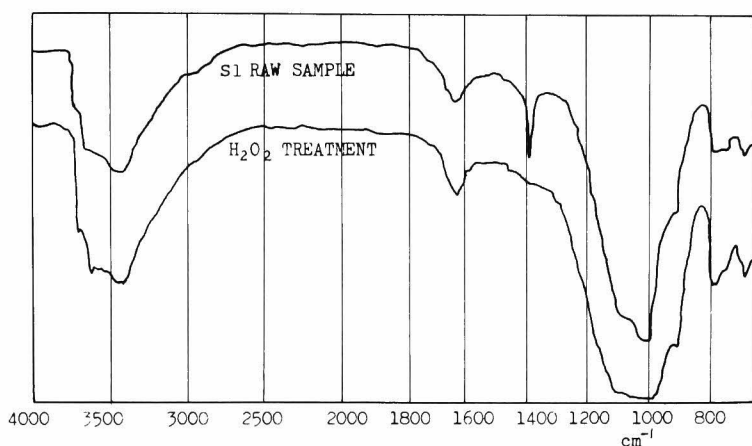
Organic content		Humic acid content	
by Bichromate M.	by Ignite- loss M.	Degree of humin	Humic acid (organic basis)
5.40 %	15.44 %	25.20 %	16.50 %

量試験として
は、通常強熱
減量法と重ク
ロム酸カリ法
とが用いられ
ている。前者

は試料を 700 ～ 800 °C の高温で焼結するため、結晶鉱物中の結合水が消失重量として含まれる。よって重クロム酸カリ法によるものを有機成分とみなす。用いたヘドロは重クロム酸カリ法で 5.4 % を示し、それが海水中にあって有機物分解度が低く、Cl⁻ イオンの妨害作用もあることから考えて、用いたヘドロの有機成分量は大きなものと結論できる。

次に有機成分の分解度を検定する。これは含有する腐植酸をアルカリ浸出 (0.2N, NaOH で溶出させ、その後 0.2N, HCl で腐植酸を沈殿させる ; 第 4 章で詳述している) させたものであって、表 2-1 にあわせ示した。腐植酸含有量は対有機物量比で 16.50 % と小さいが、溶液中では相当大きい体積をもち、高い活性を示すものである。

有機成分の反応性の解析のためには、赤外線吸収スペクトル分析がきわめて有力な手法である。KBr 錠剤法を用いたヘドロの赤外線吸収スペクトル分析結果は図 2-3 のようである。H₂O₂ で有機物を除去した試料と未処理の S1 のもののスペクトル図である。図において S1 は有機成分と無機成分の共存状態での官能基を示している。H₂O₂ 処理によって 1380 cm⁻¹ の鋭いピークが消滅しているが、このピークは -CCH₃、-CHO、有機イオウ化合物、有機ハロゲン化合物であり、これらのうちここでは有機成分を構成する結合として -CCH₃ が妥当であろう。その他に有機物の主要な結合基である OH 基は、粘土鉱物の OH に包含されて確認できないが、H₂O₂ 処理によって 3400 cm⁻¹ のピーク (粘土鉱物の八面体層中の OH による吸収) と比較して、高さの減少している



ことにより有機成分による OH の存在が知られる。また腐植酸の特徴的のピークである $1600 \sim 1650 \text{ cm}^{-1}$ の CO 基のピークは、同じく粘土鉱物の OH に包含されているものである。

図 2-3 ヘドロの赤外線吸収スペクトル分析結果

2.2.2 無機成分

ヘドロの構成要素として有機成分は 5.4 % という値がえられたので、残りの無機成分についての組成分析を述べる。後述するごとく、試料として用いたヘドロは、 $5 \mu\text{m}$ 以下の粘土分を 60 ~ 70 % 含んでおり、この粘土分がヘドロの物性にきわめて重要な影響をもつものと考えられる。よって、ここでは X 線回折や電子顕微鏡による解析、示差熱分析、赤外線吸収スペクトル分析、化学分析などを用いて含有粘土鉱物の同定と定量を行っている。

(1) X 線回折分析

ヘドロなどに含有される結晶性粘土鉱物の判定にきわめて有力である。試料調整は有機物処理し沈降法によって採取した $2 \mu\text{m}$ 以下の粒子を、アルコールサスペンション良定方位法で回折試料とした。また、同定には試料の薬品処理、熱処理を用いている。⁶⁾ 結果は図 2-4 のとおりである。まず H_2O_2 処理回折図から、 $14 \sim 15 \text{ \AA}$ のピークでモンモリロナイト系ならびにバーミキュライト、 10 \AA のピークでイライト、クロライト、 7 \AA のピークでカオリン系粘土鉱物の存在が予想される。さらに HCl 処理でクロライトの存在が確認され、 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mg}$ 処理で 10 \AA のピークが 14.8 \AA へ移動しイライトの確認、 CH_3COOK 処理で 7 \AA のピークが 14.8 \AA へ移動しカオリナイト、ハロイサイトの確認、K 飽和処理で 14.8 \AA のピークが 10.8 \AA へ移動しバーミキュライトの確認、Glycerol 処理で 14.8 \AA のピークが 17.6 \AA へ移動しモンモリロナイトの確認がなされる。以上から含有される粘土鉱物はハロイサイト、加水ハロイサイト、カオリナイトのカオリン系と、モンモリロナイト、バイデライトのモンモリロナイト系、およびイライト、クロライト、バーミキュライトである。一方、定量は回折基底線からのピークの高さ H 、⁷⁾ および回折線と基底線とで閉じられた領域の面積 A ⁸⁾ より求める簡便法を用いて、相対比で表わしている (図 2-5 のとおり)。結果は表 2-2 のようになり、粘土鉱物の相対比率はカオリン系が過半数と

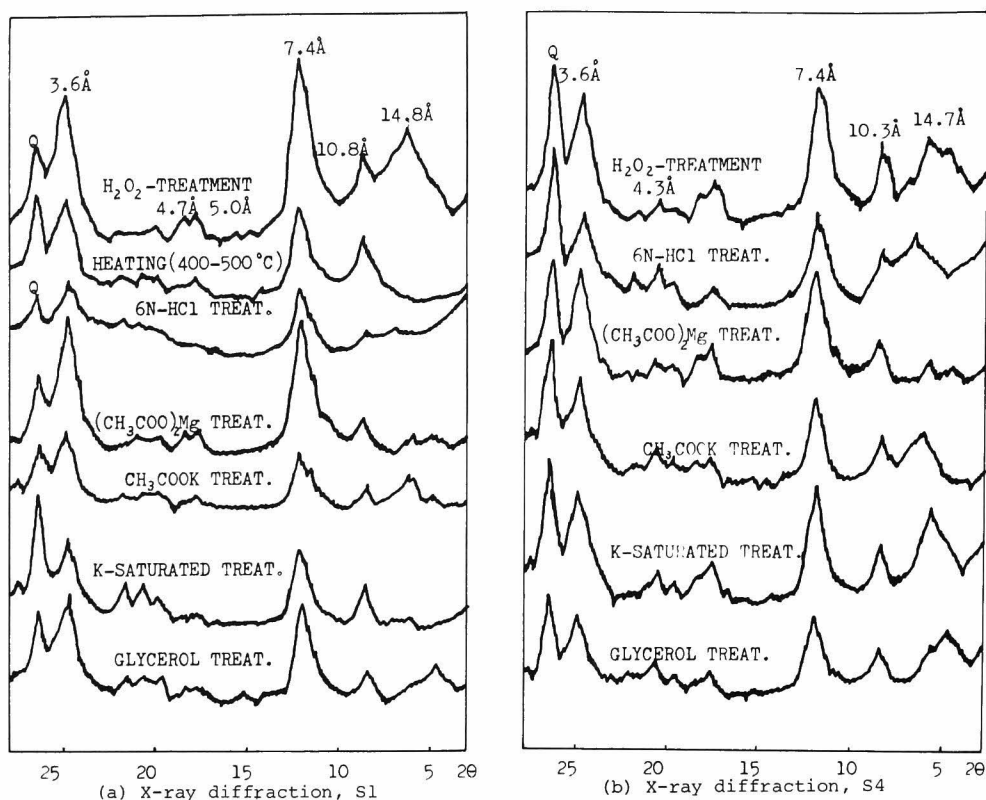


図 2-4 ヘドロのX線回折結果

なる。しかしながらS4の沖合側のヘドロではモンモリロナイト系の粘土鉱物量が増大し、粒径が微細化している源となっている。

さらに、有機成分や界面のカチオンと粘土鉱物との関連をX線回折的に検討するとつきのようになる。まず有機成分は H_2O_2 処理とし、界面遊離カチオンについてはメチルアルコール洗浄による除去法を用いた。結果は表2-3であるが、有機物を処理せず、かつ界面遊離カチ

オンを含有した場合には21.5 Åの明瞭なピークが存在し、有機物と粘土鉱物との複合体の形成が予想される。これに対し、 H_2O_2 処理を行うと有機物の粘土鉱物への吸着ピークはほとんど消滅し、これは界面遊離カチオンを洗浄した場合によりはっきりと出ている。以上から、有機物と粘土鉱物の複合体は界面カチオンの共存下で形成されやすいことが考えられ、その層間への吸着は無極性溶媒で除去される程度の弱いものであることが推定される。

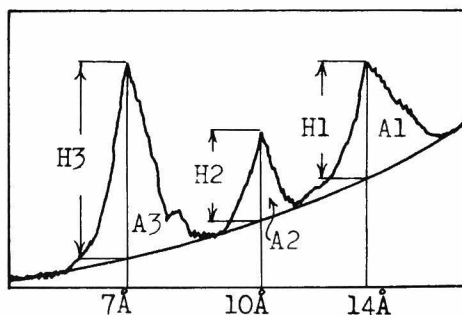


図 2-5 X線回折図から粘土鉱物の定量への模式図

表 2 - 2 粘土鉱物の相対含有比率

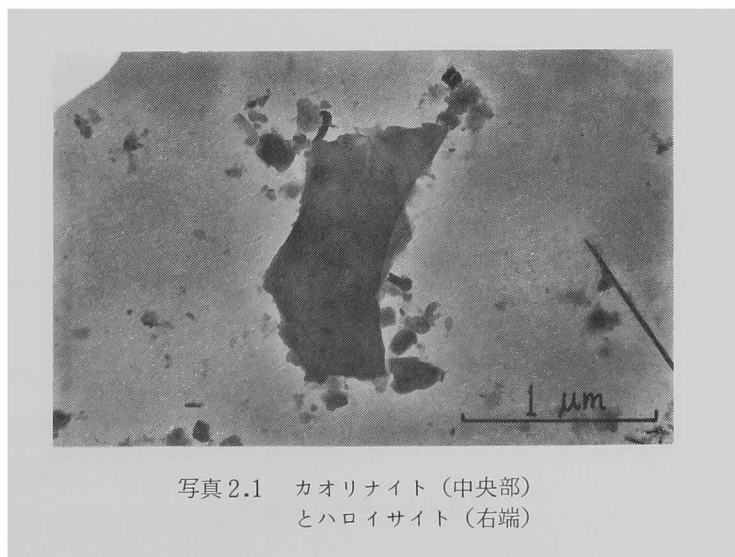
Sample	Kaolin	Illite	Ver.+Mont.	Remarks	
S1	62.0	20.0	18.0	Height	H ₂ O ₂ -treatment
	75.0	7.5	17.5	Area	
	56.5	20.3	23.2	Height	Ca-saturated
	57.1	11.6	31.3	Area	
S4	50.9	25.5	23.6	Height	H ₂ O ₂ -treatment
	54.0	14.4	31.6	Area	
	49.0	18.4	32.6	Height	Ca-saturated
	44.8	9.5	45.7	Area	

表 2 - 3 有機成分による層間隔の伸長

	Organic content (%)	Peak angstrom (Å)	
		washing by CH ₃ OH	non washing
H ₂ O ₂ -treatment	1.9	non	21.5 Å very weak
non-treatment	5.4	17.0 Å, weak	21.5 Å, strong

(2) 電子顕微鏡による観察

懸濁法を用いて観察した例は写真 2.1 ～ 2.7 のとおりである。含有粘土鉱物は不定形粒子が多く、カオリナイトであっても定形粒子（六角板状）は少ないものである。確認された粘土鉱物は(1)に述べたもののほかに、デイッカイトとみられる鉱物の存在があった。また、写真 2.6，2.7 にみられるようなケイソウ土が相当多数含まれている。



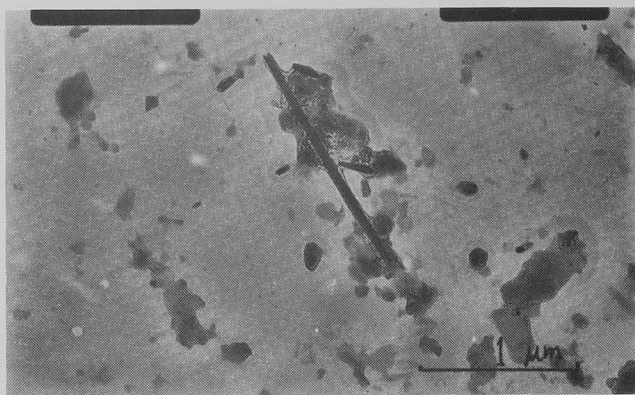


写真 2.2 ハロイサイト (中央棒状)



写真 2.3 カオリナイト (中央六角形)
とモンモリロナイト

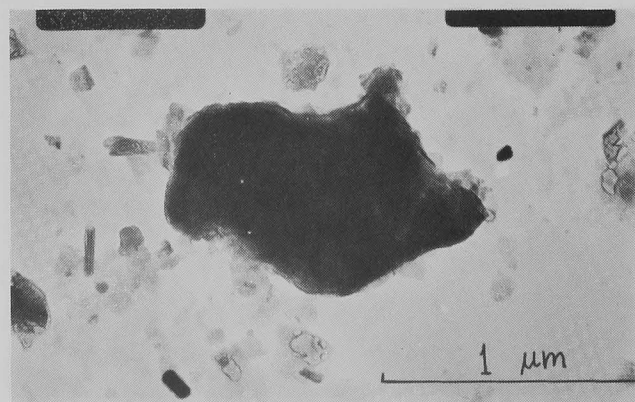


写真 2.4 カオリナイト



写真 2.5 写真 2.4 の電子回折像

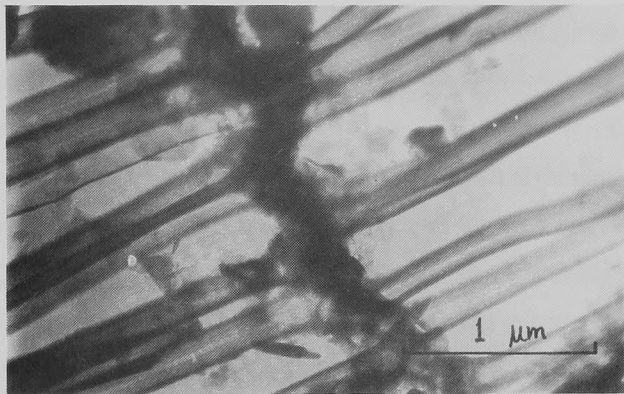


写真 2.6 ケイソウ土

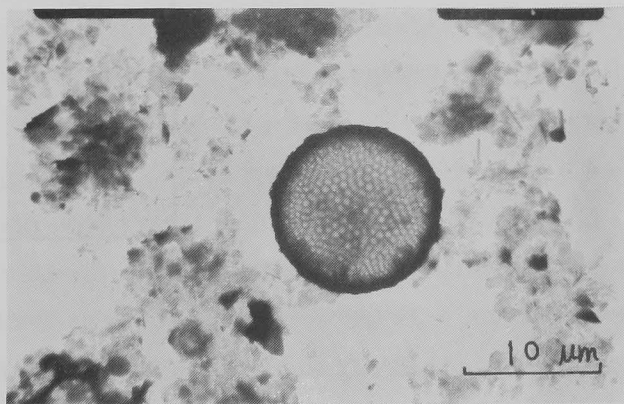


写真 2.7 ケイソウ土

(3) 示差熱分析

熱的な特性は不定形粒子の含有が大なためか、ピークは幅広であり、図2-6のDTA曲線はハロイサイトとモンモリロナイトの共存状態のような曲線を示すにとどまっている。

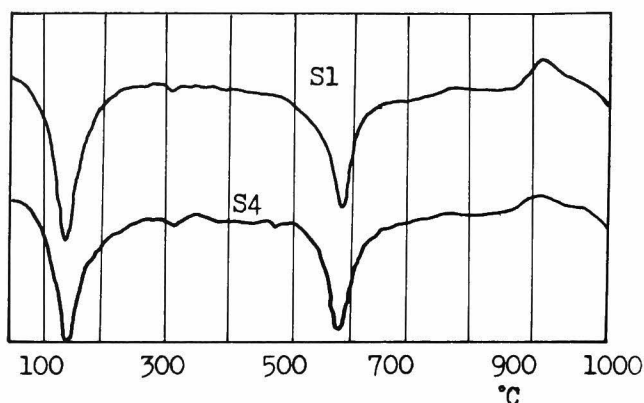


図2-6 ヘドロの示差熱分析曲線

(4) 赤外線吸収スペクトル分析

図2-3におけるピーク位置は、さきに示したモンモリロナイト、カオリナイト、ハロイサイトの存在に矛盾しない。 1620 cm^{-1} の吸収はモンモリロナイトの層間水及び吸着水によるものである。また、 $1000\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ の幅広のピークはSi-Oの伸縮振動を示している。

(5) 化学分析

系統的なケイ酸塩全分析法に基づく結果は表2-4のとおりである。ケイバン比($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)は4.46となり、全体的にみて塩基性鉱物であることを示している。分析値 K_2O が2.1%であるということは、Kの含有量が10%であるイライト系粘土鉱物が、全量に対してはほぼ20%であることを示し、X線回折結果とよく一致している。

表2-4 化学分析結果

Composition	Content %
SiO_2	42.33
TiO_2	2.04
Al_2O_3	16.09
Fe_2O_3	2.48
FeO	2.37
MnO	1.98
CaO	0.62
MgO	6.27
Na_2O	2.46
K_2O	2.11
$\text{H}_2\text{O}(+)$	5.44
$\text{H}_2\text{O}(-)+\text{Organic}$	15.68
Sum	99.87

以上の結果をまとめて、ヘドロは無定形腐植を含有する有機質粘土であり、未分解性有機物を相当量含んでいる。

含有鉱物としては石英、長石の一次鉱物のほかに、モンモリロナイト、ハロイサイト、カオリナイト、イライト、クロライト、パーミキュライトなどの粘土鉱物が存在する。粘土鉱物の含有比率からは、カオリン系がイライト系の約2~2.5倍量となっている。一般に海底における安定鉱物

はイライト系及びクロライトであり、陸水成の粘土鉱物のそれがカオリン系であることから、⁹⁾試料として用いたヘドロは海成の粘土鉱物とともに、河川からの流出に基づく陸水成粘土鉱物を多量に含むものである。このことは、すなわち、ヘドロの生成に対し河川からの流入土砂が大きく関与していることを示している。

2.2.3 界面成分

前項までではヘドロ粒子そのものについての有機成分，無機成分組成を示したが，ここではヘドロの物理的，力学的挙動の基礎となる物理化学的性質，特にヘドロの溶媒成分と粒子界面について述べる。

(1) pH

まず，粒子界面のイオン性を左右する懸濁液 pH は電気ポテンショメータで測定の結果，海水の pH が 8.24 であるのに対し，8.01（海水懸濁液中）となり弱塩基性を示している。よって土粒子界面のイオン分布にはカチオン表面が生じず，アニオンリッチの条件となっているものである。

表 2-5 界面のイオン状況

Interfacial cations(Adhesive+Adsorbed)me/100g					
Na	K	Mg	Ca	H+Al	Sum
103.1	6.3	27.0	12.3	...	148.7
Interfacial adsorbed cations				me/100g	
Na	K	Mg	Ca	H+Al	Sum
15.3	5.5	17.2	7.5	...	35.5
Interfacial anions %					
	Cl	SO ₄	CO ₃		
	1.88	0.49	...		
Cation Exchange Capacity				me/100g	
37.4					

(2) 塩基置換容量と遊離カチオン量

用いたヘドロの塩基置換容量（CEC）は酢酸アンモニウム溶液抽出，原子吸光光度計による測定によって算出している。界面吸着カチオンならびにアニオン量，遊離カチオン量（付着したもの）は表 2-5 のとおりである。ヘドロの遊離カチオン量が CEC をはるかに越えるのは，粒子に付着する塩類，特に NaCl，MgCl₂ などの影響である。

2.2.4 まとめ

本節の検討によってえられた要点をまとめるとつぎのようになる。

(1) 有機成分については，その総量を重クロム酸カリ法で求めたところ 5.40% という値がえられ，この有機成分中の分解度を腐植酸含有率の形で表わした。

(2) 無機成分については，X線回折，電子顕微鏡分析，示差熱分析，赤外線吸収スペクトル分析，化学分析等を行って，構成粘土鉱物の同定と定量を実施した。

(3) 構成粘土鉱物はモンモリロナイト，ハロイサイト，カオリナイト，イライト，クロライト，パーミキュライトなどからなっている。なお，造岩一次鉱物として石英，長石を含んでいる。

(4) 粘土鉱物の比率として，（カリオン系）：（イライト雲母系）：（モンモリロナイト系）＝6：2：2～5：2：3 の割合でみられ，河川からの流出土砂による陸水成粘土鉱物の補給が多いことを示している。これは用いたヘドロが大和川河口沖合に位置するためである。

(5) 界面成分として pH や塩基置換容量などを測定し，CEC が 37.4 me/100g と相当高く，さ

らに付着遊離カチオン量も $148.7 \text{ me}/100 \text{ g}$ と海水条件に依存してきわめて多くなっている。

(6) 以上のように大阪ヘドロの組成分析として、有機成分、無機成分、ならびに界面成分についてそれぞれの構成を明らかにすることによって、用いたヘドロが有機質複合体であるものの、一般の冲積粘土の延長線上にあるものとみなすことができた。

2.3 超軟弱粘土の沈降性状

2.3.1 沈降性状を左右する要因

ヘドロの物理化学的な特性が顕著に示される現象として沈降性状をあげることかできる。ヘドロが沈降・堆積した場合、その粒子構造は堆積の過程と応力履歴をも含めた環境条件とによって決定される。沈降性状の解明のための要因として、つぎの諸点があげられる。^{10),11)}

- (i) 土粒子の性状
- (ii) 界面の溶液の特性
- (iii) 土粒子以外の固体（例えば有機物など）の性状
- (iv) 懸濁液の濃度
- (v) 土粒子の集合・堆積状態

このような諸要因に関するこれまでの成果をあらかじめ概観するとつぎのようである。

(i)についてはヘドロを構成する粘土鉱物の種類と量によるものであって、粘土鉱物の活性・不活性に関連する。

(ii)の場合は塩分濃度（海水中あるいは淡水中）によるものであって、電気化学的な性質に直接関与している。これは図2-7のような構造をもつとされている。¹²⁾ すなわち、板状の粘土粒子は海水中で(a)のように面一面向接触をもったオープン配列構造をとるのに対し、淡水中では(b)のようになり端一

面接触が卓越する。(c)はこれらの中間の電解質濃度

(汽水)で

あり、粒子は

分散状態で堆

積する。臨海部での海域ヘドロを取り扱うときは(a)の塩分綿毛化の場合を考慮すればよいことになる。なおこのような微視的堆積構造については第3章で詳述する。

(iv)の懸濁液の濃度による差については沈降・堆積時のヘドロ粒子供給量に依存する（洪水時の

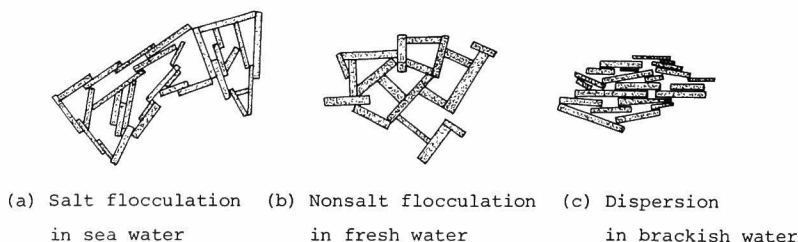


図2-7 塩分濃度による沈降・堆積構造の相異

河川からの流入とか埋立工事など)。懸濁液濃度の増大に伴って沈降速度が低下し、図2-8のような沈降パターンをとるものである。図中の4つの領域はそれぞれ次の状態をさす。

- I ; 他の粒子に影響されずに自由沈降する
- II ; 凝集した粒子が自由沈降する
- III ; 粒子相互の干渉によって自由沈降ができず、スラリー界面を形成して沈降する。
- IV ; スラリー全体の内部水が上方の目重によって排出されて圧縮が進行する、場合によってはスラリー内部にキレツを生じる。

これらの領域でI, II, IIIが沈降過程とみなされ、IVのいわゆる目重圧密と区別される。

さらに懸濁液中の密度分布をX線で測定したつぎのような報告がみられる(図2-9)。¹³⁾ I/I_0 はX線の透過率を示し、懸濁液の沈降によってスラリー部分が全体的に密度が増すのではなく、初期の密度が一定の状態に保持されて沈降し、下部でその状態が破れて密度が増大することを明らかにしている。この密度一定の部分が土粒子の凝集沈降を表わし、下部の密度増大が目重圧密の始まりとみなされる。

以上のように、(i), (ii), (iv)の要因に関する研究と比較して、(iii)と(v)の要因については沈降特性の基本的メカニズムに関与するものでありながら、これまでほとんど研究されていない。よってここではこの両者についての検討結果を以下の各項において明らかにするものである。

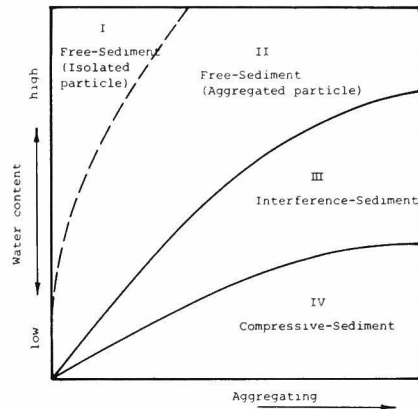


図2-8 懸濁液濃度の差に基づく沈降パターンの変化の模式図

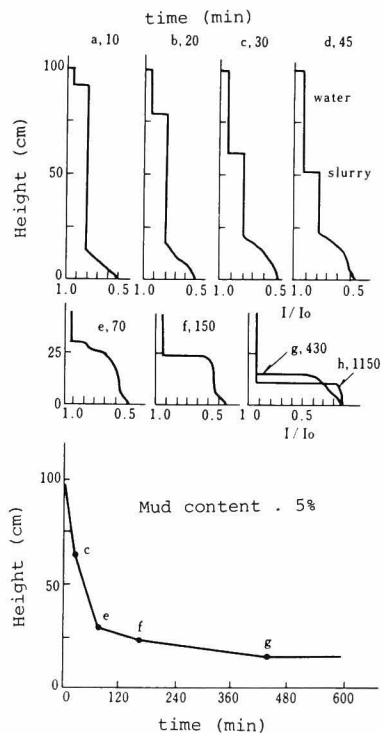


図2-9 懸濁液の密度分布と沈降曲線

2.3.2 沈降における土粒子以外の固体(有機物)の影響⁴⁾

(1) 実験の方法

有機物の沈降特性に及ぼす影響を検討するためにつきの実験を行った。

(i) 有機成分量 4 段階試料を H_2O_2 処理 (処理 H_2O_2 量の相違に依存させる) によって作成する。用いたヘドロは SI 試料であり, 作成供試体は表 2-6 のとおりである。

表 2-6 有機成分量の調整試料
(SI 試料の H_2O_2 処理による)

	B1	B2	B3	B4
Organic content	5.4 %	3.6 %	2.7 %	1.9 %

(ii) (i) の試料について含水比を求め, 炉乾重量にして 0.5, 1.0, 2.0 g となるよう秤量し, 沈降容器 (25cc メスシリンダー) にとる。

(iii) 海水を加えて 25cc とし, 24 時間放置する。

(iv) その後 1 分間激しく振とうし, 1 時間放置する。

(v) これを 1 分間静かに上下逆転させる方法で攪拌し静置した後, このスラリー界面の沈下を測定する。

沈降に及ぼす攪拌条件の影響は, 上記の手法ではば乱れを除去することができ, かつ分散よく測定しうるものである。また, 実験はスラリー界面の沈下を測定していて, スラリー内部の沈降状態は検定していない。しかし, 現実に問題となるのは 2.3.1 で述べたように, 干渉沈降時の界面の沈下であることから妥当な方法である。

(2) 実験の結果と考察

沈降状態は図 2-10 のようであり, 沈降速度は図 2-11 のようになった。有機成分量の増加とともに最大沈降速度は増大しており, 沈降の中期において等速沈降領域が存在する。最終沈積量は図 2-12 のとおりである。

以上の結果から, 海水中では有機成分がスラリー界面の沈降速度を著しく増大させ, しかも最終沈積量を減少させる。このことは有機成分が安定で密な団粒を形成して, 凝集体をなしているものと考えられる。

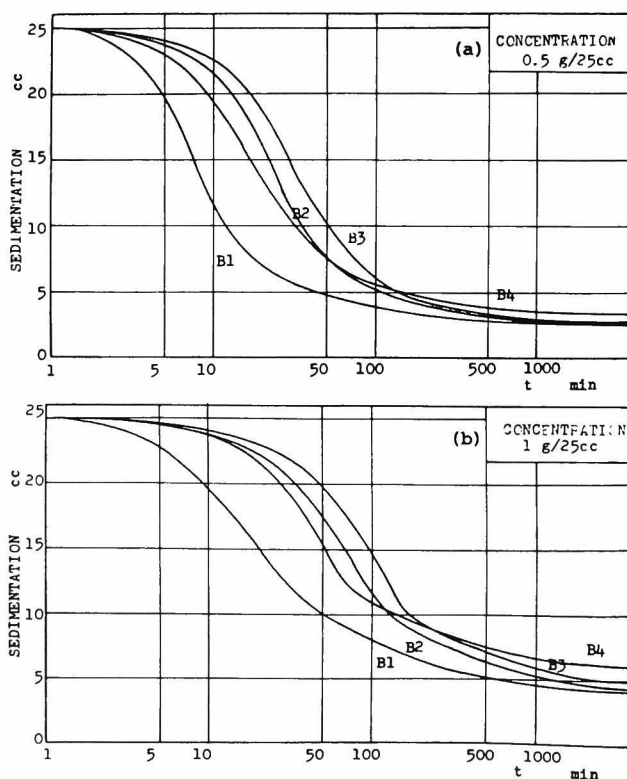


図 2-10(a),(b) 沈降曲線

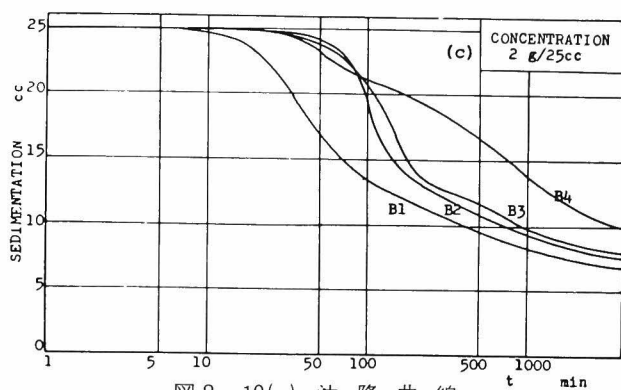


圖 2-10(c) 沈 降 曲 線

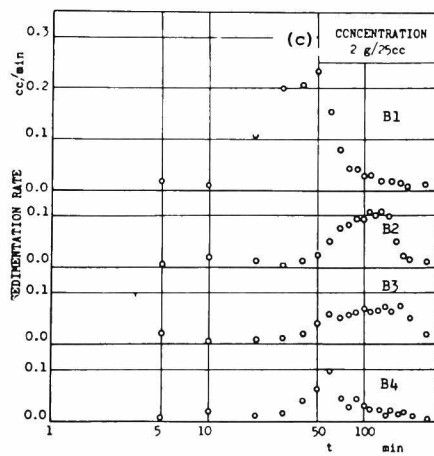
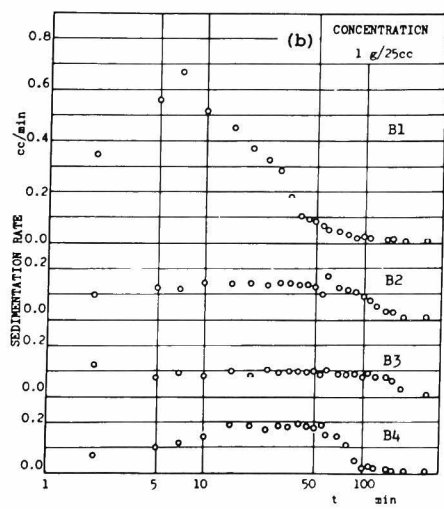
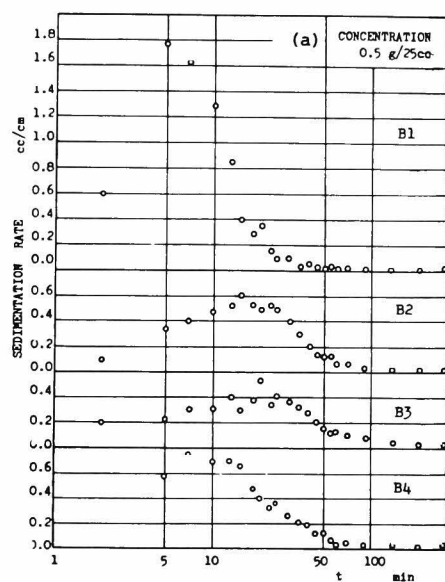


圖 2-11 沈 降 速 度

一般に土粒子は凝集すると沈降速度が増大し、最終沈積量は高くなるとされているが、¹⁰⁾ 凝集には2つのパターンがある。すなわち、有機物などによる安定な団粒による凝集と、電解質によって生じる綿毛化凝集とである。沈降速度は前者が大であり、最終沈積量は後者が大である。ここではB1の場合が前者に相当し、B4の場合が後者となる。

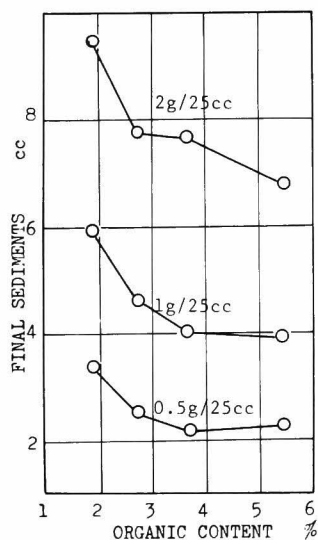


図 2-12 最終沈積量

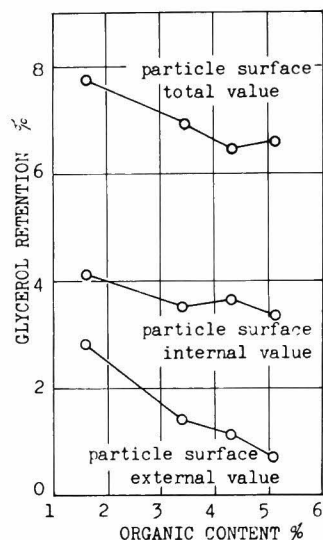


図 2-13 ヘドロ粒子表面へのグリセロール吸着量

(3) 有機物による沈降団粒に関する検討

有機物による安定な団粒に関しては以下の検討を行った。

有機物が粒子と結合して、さらに粘土鉱物の層間に吸着されて団粒化をきたしている場合には、マスとしての表面積は減少し、かつ粒子の内表面も減少するはずである。そこで、土粒子表面へのグリセロール吸着量を測定すると図 2-13 のようになる。この方法は、110℃グリセロール雰囲気中における土粒子表面へのグリセロール分子吸着が、単分子層吸着であることを前提として表面積を測定する手法である。¹⁴⁾ ヘドロは多種粘土鉱物の混合系であるから、表面積とせずにグリセロール保持量のままで表わしている。全表面は試料をアルコール置換して乾燥したものに対する保持量であり、外表面についてはこれをさらに 500℃以上で4時間加熱して鉱物粒子中の内表面、すなわち層間表面を除去して保持量を求めたものである。図によれば、有機物量の増大に伴ってグリセロール保持量が減少しており、有機物によって粘土粒子が相互に密な状態で接触していることを示し、これはとりもなおさず有機物の安定団粒を表わしている。

2.3.3 沈降における土粒子の集合・堆積状態¹⁵⁾

前項で述べたように粘土粒子の沈降ならびに堆積は、団粒の状態で行われるものであるが、その

団粒メカニズムは物理化学的特性、特にそれに基づく凝集・分散などの集合・堆積状態に大きく左右される。さらに海底表層のすべりに対する安定性の吟味などは、凝集粒子の水中における安息角との関係で検討する必要がある。ここではこのような沈降時における凝集・分散性について、凝集剤・分散剤を添加することによる特性の変化、及び媒液中で形成される見かけ粒子径とそれに密接に関係している安息角との関連、ならびに凝集力の影響などについて検討している。

(1) 実験の方法

(i) 試料としては大阪南港粘土を用いた。

(ii) 添加剤……凝集剤として、有機系高分子パンフロック (PAF)，無機系高分子ポリ塩化アルミニウム (PAC)，分散剤としてピロリン酸ソーダ (PN)，ヘキサメタリン酸ソーダ (HM) を用いた。

(iii) 沈降試験……前節の方法に準じるが、試料の含水比を 1000%，500% に調節して、凝集・分散剤を添加し、1000cc のメスシリンダー中にて沈降試験を行う。

(iv) 安息角の測定……図 2-14 に示すガラス製容器を用いた。¹⁶⁾

図中の B，C に媒液を満し、試料を D に入れてロート C から落下させる。台皿 A の上に形成された円錐状の堆積を一定位置にセットしたカメラで撮影し、その写真から安息角 ϕ_0 を測定する。台皿は直径 2cm，高さ 1cm で皿面での粒子摩擦を少なくするためにテフロン台を用いた。なお媒液と試料の間の密度流を防ぐため、落下口は 2 重管構造となっている。

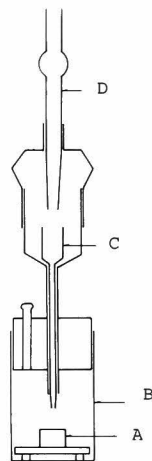


図 2-14 安息角測定容器

(2) 実験の結果と考察

沈降実験の結果の例は図 2-15 のとおりである。図 2-15(a) は添加濃度 500 ppm (試料炉乾重量に対するもの) の場合であるが、凝集剤の PAC がある濃度では分散効果をもつことを示している。

図 2-15(b) の PAF，

PAC の同時添加では微量の濃度で大きい凝集作用を示すことがえられている。これらから沈降速度を求めたものが図 2-16 である。添加濃度による凝集・分散作用の変化がより明

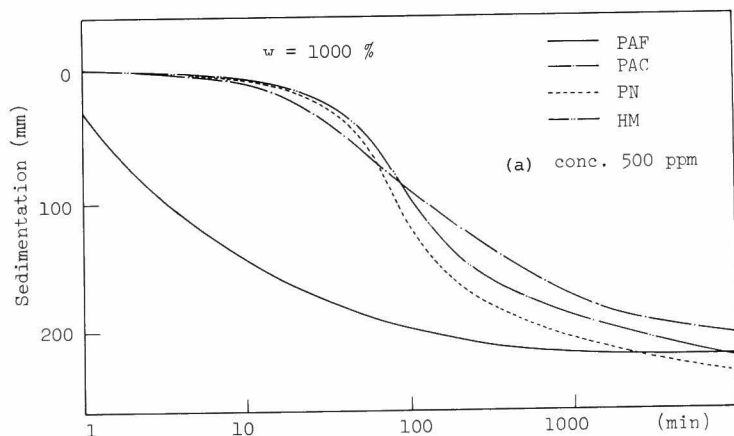


図 2-15(a) 凝集・分散剤による沈降曲線の変化

らかであり、分散剤の添加によってほぼ一様に沈降速度が遅くなっており、添加剤を加えない場合における団粒の状態を示唆している。最終沈降間げき比 e_n との関係で示すと図 2-17 のようになる。PAC の大きい e_n に対して、同じ凝集剤である PAF は添加濃度の差にもかかわらずほぼ一様の e_n を示している。沈降速度から求めた見かけ団粒粒子径 D と e_n との関係は図 2-18 のとおりである。添加剤の種類と量が、団粒の粒径に関与するものとすれば、図中の連続折れ線を Roller の法則に従ってひくことができる。折れ線はそれ以上の粒径では充填率がほぼ一定であることを意味しており、これ以前の粒径では、粒径が小さいほど間げきが

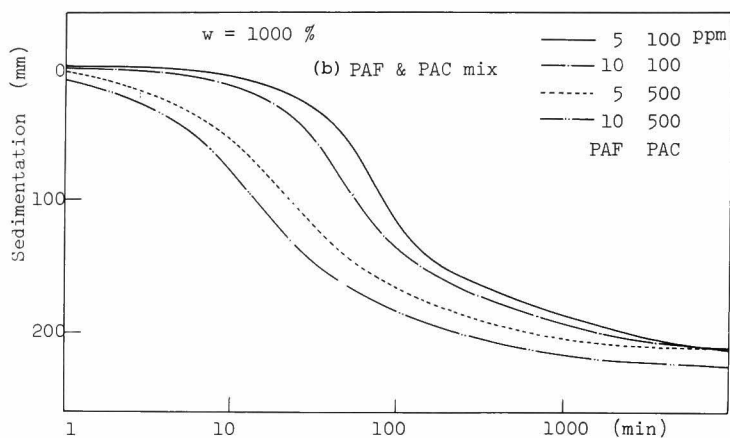


図 2-15(b) 凝集・分散剤による沈降曲線の変化

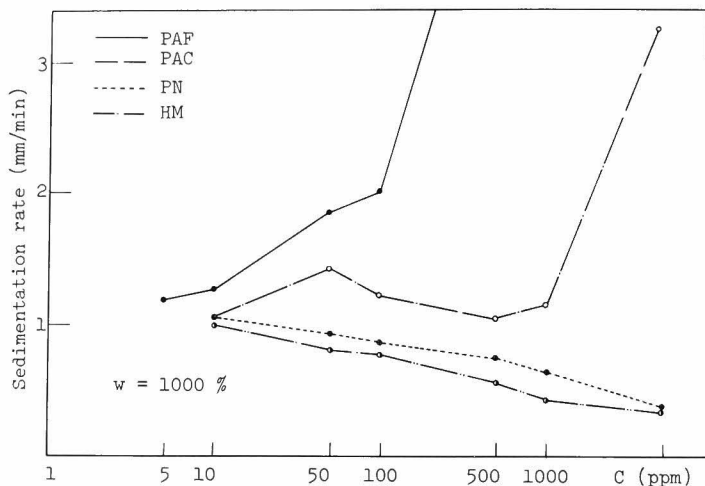


図 2-16 凝集・分散剤による沈降速度の変化

のとすれば、図中の連続折れ線を Roller の法則に従ってひくことができる。折れ線はそれ以上の粒径では充填率がほぼ一定であることを意味しており、これ以前の粒径では、粒径が小さいほど間げきが

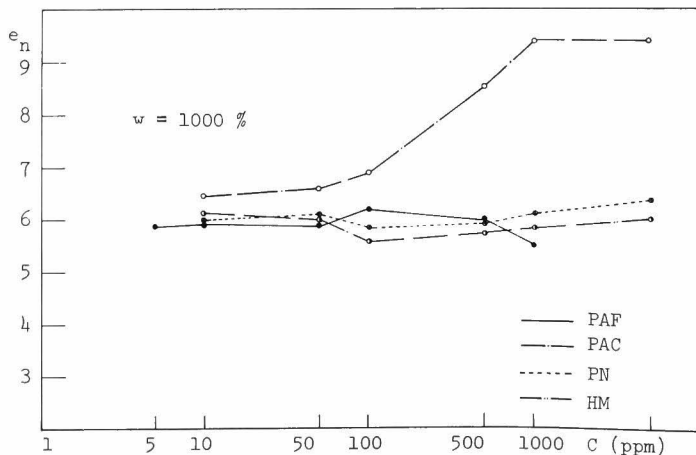


図 2-17 凝集・分散剤による最終間げき比の変化

大きいことを表わしている。Rollerの法則は均一粒径の充填構造から導びかれているが、粘性土の場合でも $50\mu\text{m}$ 程度以上の団粒粒子で粗粒土的な様相を示すものである。

安息角の測定状況は写真 2.8 ～ 2.11 のようである。写真に例示しているように、傾斜角 ϕ_0 とその時の堆積高さ h とを測定している。

写真からも知られるように分散剤による場合はきわめて堆積高さが低く、落下量にも影響を受け測定値に誤差を生じさせているようである。

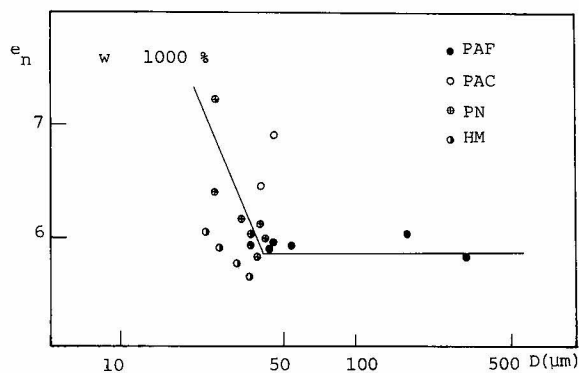


図 2-18 最終間げき比と見かけ団粒径

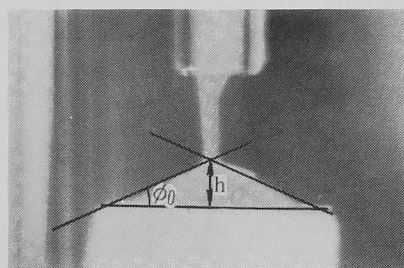


写真 2.8 安息角の測定
PAF の場合 (500 ppm)

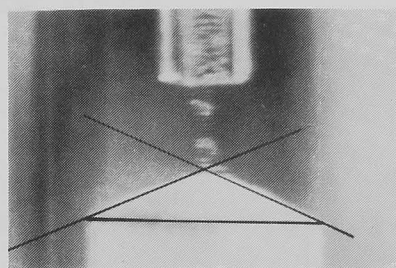


写真 2.9 安息角の測定
PAC の場合 (500 ppm)

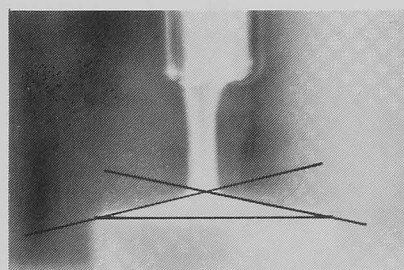


写真 2.10 安息角の測定
HM の場合 (500 ppm)

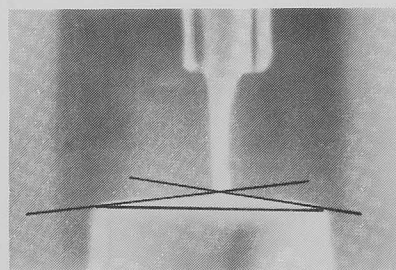


写真 2.11 安息角の測定
PN の場合 (500 ppm)

図 2-19 は安息角と添加濃度との関係を示し、PAF，PAC の高分子凝集剤は粘土粒子間をからみ合わせて団粒化させるものであって大きな安息角 ϕ_0 を生じている。図 2-20 は見かけ団粒径 D との関連を表わしている。さきの凝集作用との関係から、 D が $50\mu\text{m}$ 以上のとき、安息角はは一定となるはずであり、図からそれが約 30° であることがわかる。図 2-21 は安息角と堆積高さの関係であるが、本来直線でなければならないのがそうでないのは、凝集剤による粒子もりあがりの影響にもとづいている。

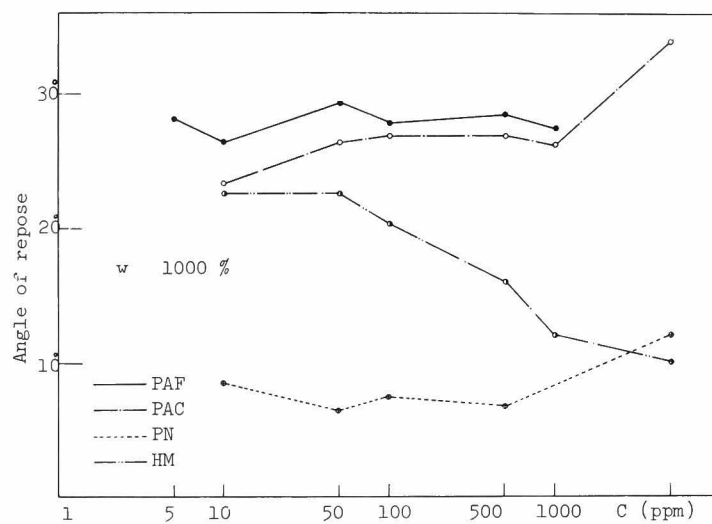


図 2 - 19 安息角と添加剤濃度

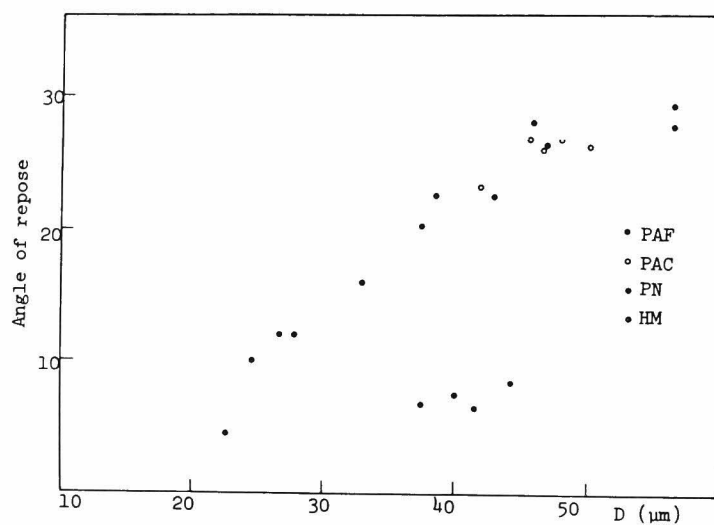


図 2 - 20 安息角と見かけ団粒径

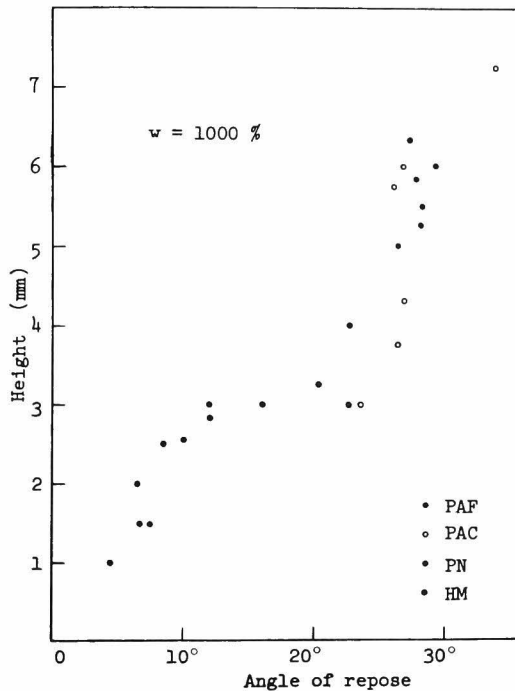


図 2-21 安息角と堆積高さ

ここで、 E ; 凝集力, A ; van der Waals 定数, l ; 団粒粒子表面間の距離である。 l として電気二重層の厚さ K^{-1} の 2 倍 ($=2K^{-1}$) をとることができる。

$$K = \sqrt{\frac{8\pi z^2 C e_q^2 N}{1000 \epsilon k T}}$$

ここで、 z ; イオン価,
 C ; 対イオン濃度
 e_q ; 電子の電荷
 N ; アボガドロ数
 ϵ ; 誘電率 (水の誘電率を用いる)
 k ; ボルツマン定数
 T ; 絶対温度

用いた試料の対イオン濃度を計算し、これをパラメーターとして PAC, HM について示したものが図 2-22 である。

(3) 沈降時の粘土粒子間の凝集力と堆積の状態

このような結果の 1 つの説明として粘土粒子間の凝集力の影響について検討してみる。およそ粘土粒子間に作用する力には反発力とけん引力とに分けられ、特に粒子の凝集については後者の影響が大きいものである。ここでは、単独粒子の自由沈降ではなく、凝集した団粒粒子の沈降を取り扱っているから、この団粒時に作用する力を検討すべきである。団粒粒子の大きさと凝集力との間には Hamaker によって次式が導かれている。

$$E = \frac{AD}{24l^2}$$

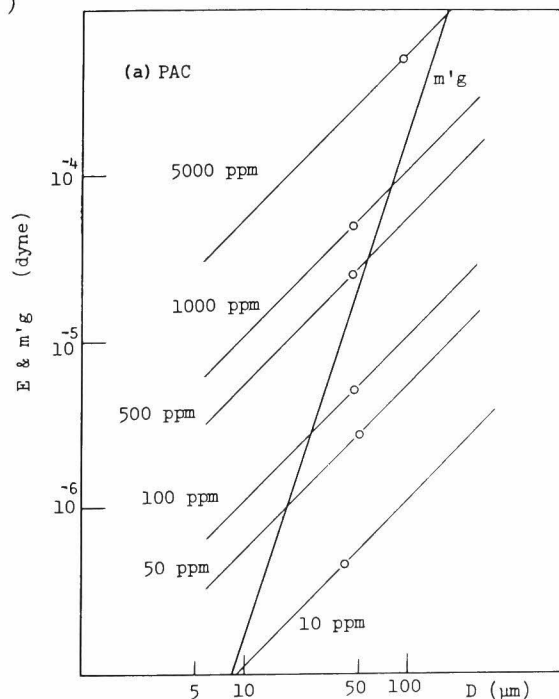


図 2-22(a) 凝集力と自重の関係 (PAC)

一方、試料の水中での重さ $m'g$ は添加剤の濃度の比重に及ぼす影響を無視するので、見かけ団粒径 D のみの関数として表わせる。 E 線と $m'g$ 線との交点は $D = 10 \sim 100 \mu m$ の範囲にある。この交点の団粒径より大きいところでは $E < m'g$ となるから凝集力より団粒の自重の方が大きく、団粒の積み上りは生じない。ところが $E > m'g$ となる D では凝集力が大きくなって、上から落下した団粒が元の団粒の上に積み上がりかが生じるものでルーズな間げきをもった堆積構造となる。図中の○印が沈降試験からえられた D を示しており、交点の位置から少しずれているもののきわめてラフな算定としては妥当な結果がえられている。

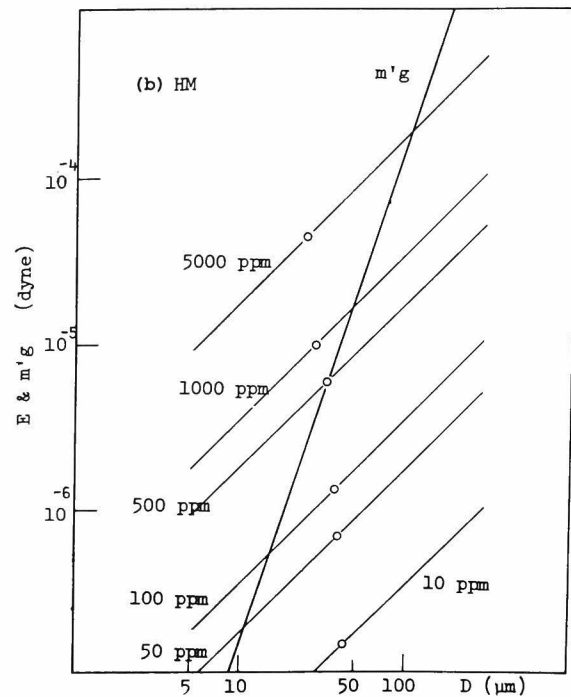


図2-22(b) 凝集力と自重の関係(HM)

以上、巨視的な観点からの集合・堆積状態を示したが、このときの粘土粒子の微視的な構造については何ら触れておらず、検討を次章に譲るものである。

2.3.4 まとめ

ヘドロのような超軟弱粘土の沈降特性について検討し、えられた成果を整理するとつぎのようになる。

- (1) 沈降時における有機物の影響ならびに沈降時の土粒子の集合状態を明らかにした。
- (2) 有機成分量の増大に伴って沈降速度が著しく大きくなる。しかも沈積後の容積が小さくなり密に堆積することが判明した。
- (3) 有機成分は安定な団粒を形成して凝集体をなしていることを、沈降後の団粒粒子中へのグリセロール吸着量試験から明らかにした。
- (4) さらに、凝集剤・分散剤を添加して、その時の沈降状態を土粒子の集合・堆積状態の観点から検討した。
- (5) まず沈降時の等速沈降速度から、ストークスの法則を用いて見かけ団粒径 D を算定し、沈降体積がRollerの法則に従うとみなしうることを示した。

(6) 水中における団粒粒子の堆積状態を安息角 ϕ_0 で表わし、それが沈降時の凝集・分散性に大きく依存することを明らかにした。

(7) 沈降時の凝集力 E と堆積の状態を検討し、これを団粒粒子の水中重量と E との大小関係から示した。

2.4 超軟弱粘土の力学的性質

2.4.1 超軟弱粘土の物理的性質

用いたヘドロの物理的挙動として、物理定数ならびに粒度分布をそれぞれ表 2-7、図 2-23 に示す。

超軟弱粘土の物理的性質について、これまでの報告¹⁷⁾をも参照してとりまとめるとつぎのようになる。

表 2-7 ヘドロの物理定数

	S1	S4
Liquid limit (%)	120.6	129.5
Plastic limit (%)	36.9	40.2
Plastic index	83.7	89.3
Activity	2.04	1.92
Shrinkage limit (%)	30.1	32.3
Specific gravity	2.658	2.648

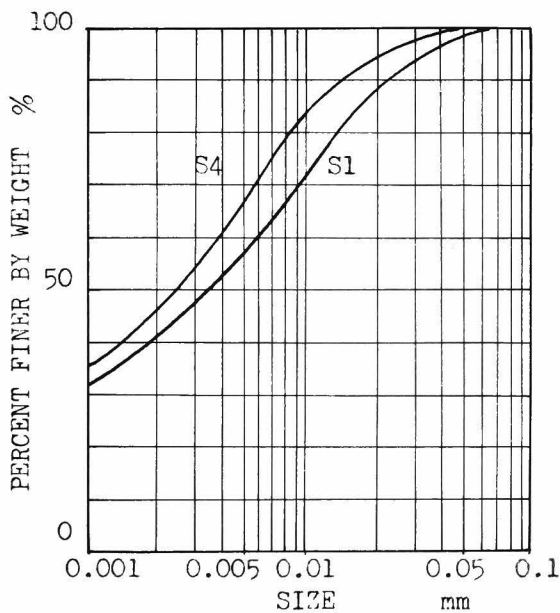


図 2-23 ヘドロの粒度分布

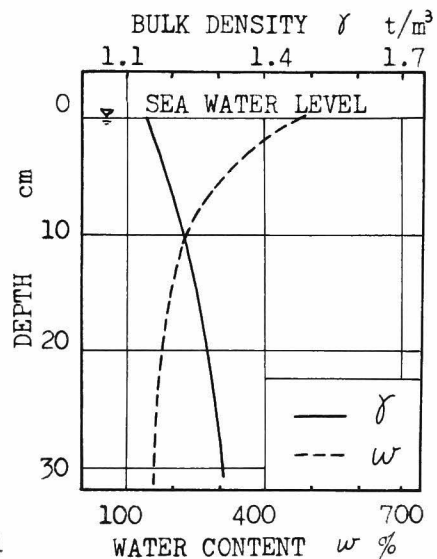


図 2-24 ヘドロの堆積深度分布

物理的性質を特徴づけるものとして、自然含水比が非常に高いことがあげられる。図 2-24 にヘドロの深度分布の例を示す。通常は 150～250 % 程度であるが、さきに述べた音波測深の 200 KHz 近くでは 400～500 % 程度のものかみられ、中には 700 % 以上のものもある。極表層部については、潮流・潮汐などの影響によって地域的・季節的変動が激しい。粒子比重は 2.5～2.8

程度に多く分布し、有機物含有量の多い場合には2.0前後のものも認められる。しかしながら概して通常の沖積粘土の場合と変わらない。図2-25は各地域で実施された調査結果に基づいて、ヘドロの土質構成を三角座標によって表示したものである。各地域により海底ヘドロの構成は、きわめて変化に富むものといわざるをえない。

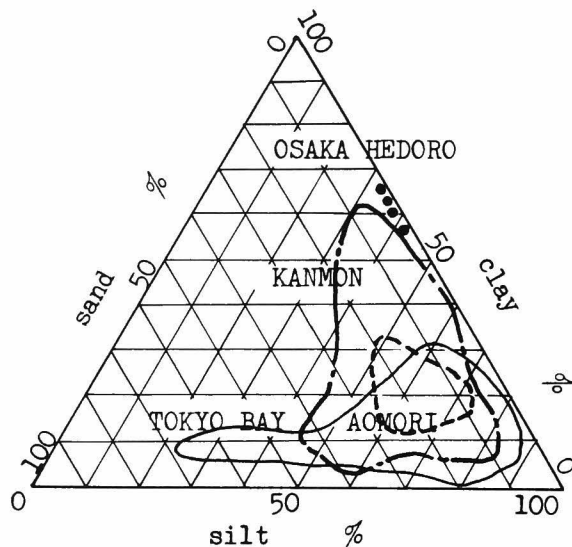


図2-25 ヘドロの粒度構成

2.4.2 超軟弱粘土の圧密特性

超軟弱粘土の圧密特性は、自然含水比が相当大きいいため沈降と圧密の両過程を伴うものであるが、ここでは2.3に示した沈降過程終了後の自重圧密における挙動から、通常の有効応力の段階までを連続的に吟味するものである。

(1) 実験の方法

自重圧密開始時点からの圧密特性ということで、つぎのような方法によっている。

(i) 初期含水比500%になるように試料調整し、これを図2-26のような沈降・圧密容器に入れる。

(ii) この容器で約1週間の沈降をさせる。その後上部のアクリルパイプを取りはずし、圧密リングAに圧密台Bをセットする。その後、上下転倒させて、沈降台D上の補助リングCの1方向から針を突きさして、

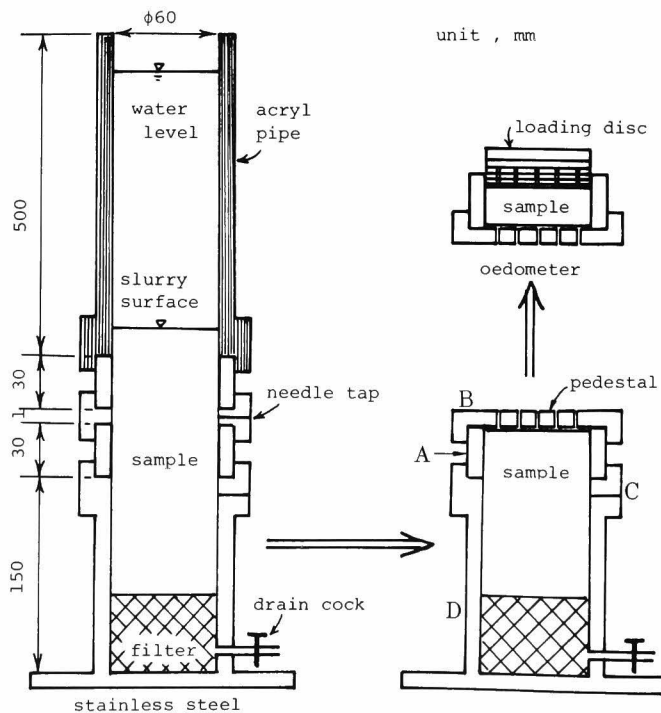


図2-26 沈降・圧密容器

リングを回転しながら試料を切断し、Aをとりはずす。リングAに残る試料が圧密供試体ということになる。よって圧密の初期層厚は30mmである。

(iii) 上部にろ紙を敷いた後、厚さ1.5mmのステンレス製有孔載荷板(重量28.6g)を静かに載荷する。これは $p = 0.001 \text{ kg/cm}^2$ に相当する。

(iv) 載荷後の沈下量を読みとる。このように小さい有効応力レベル($0.001 \leq p \leq 0.05 \text{ kg/cm}^2$)ではダイヤルゲージのバネ圧力(60~90 g)を無視できないため、沈下量の測定はマイクロメーターによった。なお $p = 0.05 \text{ kg/cm}^2$ 以上の載荷は圧密載荷枠を用いた。

(v) このようにして非常に小さい有効応力レベルから荷重増加率 $\Delta p/p \approx 1.0$ での標準圧密試験方法により段階載荷するものである。

以上の方法では、自重の影響をほとんど無視しうるものであり、沈降底部の粗粒分を除去しているので、平均的な圧密特性を検討することになる。ただ層厚の変化が沈下量に比べて大きくなるが、ここでは無視している。

(2) 実験の結果と考察

圧密特性は図2-27, 2-28のとおりである。 $e \sim \log p$ 関係を示す図2-27の2本の曲線は、圧密開始時の含水比の相異を示している。ここでは初期の部分を除いて直線性を生じている。全体としてみると $p = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ の近傍で折れ点が生じており、その前後の荷重範囲で2段階の圧密特性を示している。 C_c で比較すると図の右上方に示したようになる。この折れ点の間げき比3.1は含水比に換算すると、用いたヘドロの液性指数が1.0になる場合に相当しており(厳密にはヘドロの $w_L = 121\%$ であるから、完全飽和状態として $e = 3.266$ となる)、その前後で超

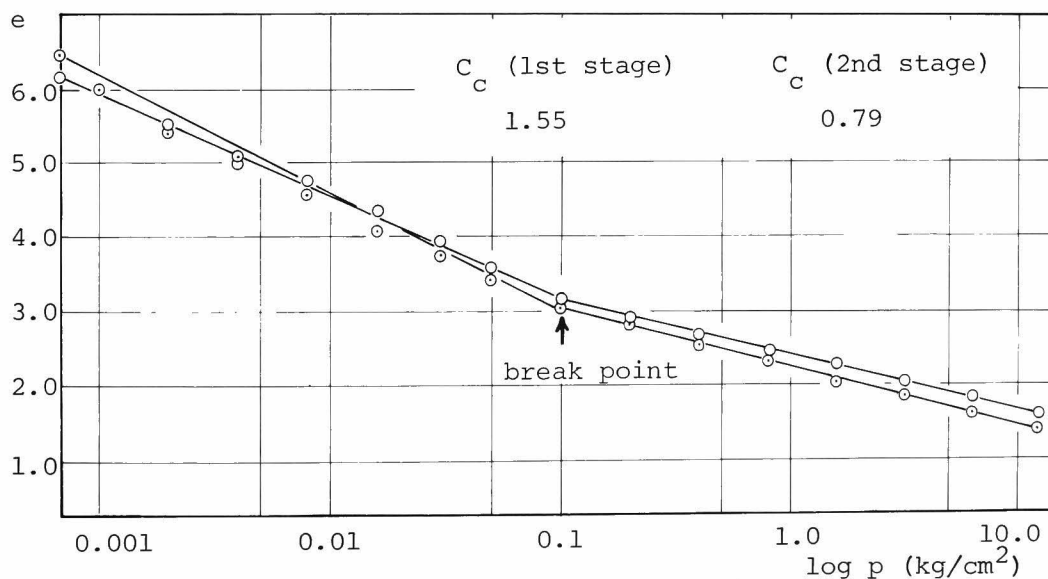


図2-27 超軟弱粘土の $e \sim \log p$ 曲線

軟弱粘土の挙動ならびに構造が変化することを意味している。Peynircioglu(1973)¹⁸⁾やMcConnachie(1974)¹⁹⁾によっても、ほぼ同様の報告がみられ、これを土構造の相違に基づくとしているが、今後の検討課題としたい。さらに、透水係数 k は $e \sim \log k$ の直線性について結論しえないものの、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/min と相当大きい値をとっている。なお、 c_v については特徴的な変化がみられていない。

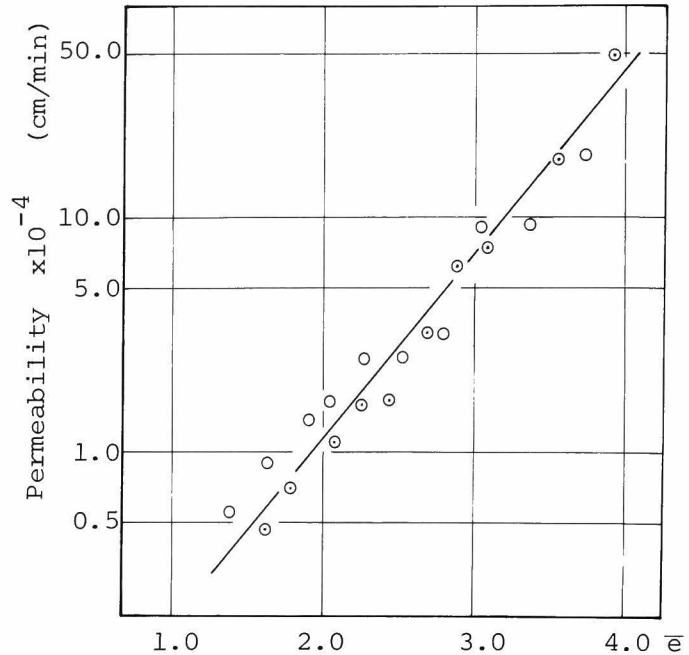


図 2-28 超軟弱粘土の透水性の変化

2.4.3 超軟弱粘土の強度特性

これまで述べたように、超軟弱粘土は沈降・堆積時の高含水比が問題の対象になるから、その支持力といってもきわめて低いものである。この対策として安定処理がなされるが、そのための基礎的情報として、超軟弱な状態での堆積表層のせん断強度特性をあらかじめ明らかにしておくものである。

(1) 実験の方法

(i) 直径 25 cm, 高さ 30 cm の底付き塩化ビニールパイプ容器に初期含水比 500 % に調整した試料をとる。

(ii) 沈降終了後、所定の期間密封養生した試料に、試料台部回転式ベーンせん断試験機によって表層強度を求める。なお、せん断時には試料上部の海水は完全に除去している。

(iii) せん断速度は $1/50$ ラジアン / sec とした。

(iv) その後、容器中の試料を完全に練り返し、乱した試料のせん断強度を同様にして求める。

(2) 実験の結果と考察

表層強度の測定の結果は図 2-29 のとおりである。堆積初期表層の強度をシキソトロピー変化として表わしている。さらに鋭敏比を \times 印で示した。沈降後の間けき比は 6.3 ~ 6.5 の範囲であったが、ここでは含水比変化（試料表面からの自然乾燥）が生じないように養生しているから試料の自重圧密効果のみということになる。

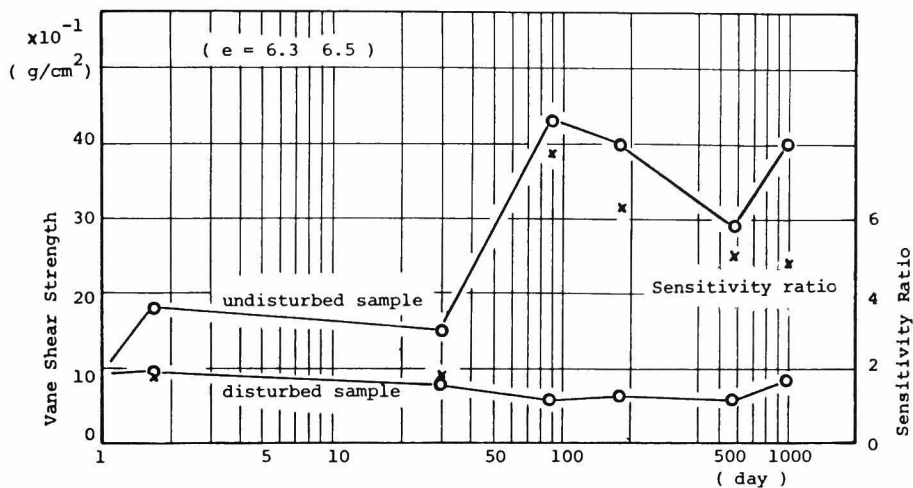


図 2-29 超軟弱粘土のベーンせん断強度と鋭敏比

2 日後で鋭敏比にして約 2.0 の強度上昇がみられ、100 日程度経過すると乱した場合の約 5 倍の強度となり、それ以後の増大はほとんどみられない。

表層のトラフィカビリティーをうるには、乾燥及び安定処理が必須であること、下部層が長期にわたって鋭敏な状態で残存することを物語るものである。

2.4.4 ま と め

超軟弱粘土の力学的特性として、物理的性質、圧密・強度特性などについて検討した。本節でえられた結果を整理するとつきのようになる。

(1) 物理的性質では、物理定数、粒度分布を示し、用いたヘドロが粘土分をきわめて多量に含んでいることを明らかにして、これまで報告されているヘドロの物理的性質との関連でとりまとめた。

(2) 圧密特性としては、きわめて小さい有効応力のレベルから、通常の標準圧密試験の範囲までを連続的にフォローしうる試験装置によって実験を行った。その結果、目重圧密後の $e \sim \log p$ 曲線で折れ点が生じ、それがヘドロの液性指数 1.0 の近傍に相当する特異点であることを示した。

(3) 強度特性としては、堆積ヘドロの表層のベーンせん断強度を求め、シキソトロピックな強度増加が 100 日間程度経過で飽和に達することを明らかにした。よって圧密・脱水を経ない超軟弱粘土層では長期にわたってきわめて軟弱な状態が継続されるものである。

2.5 結 論

本章では、超軟弱粘土の組成ならびに基本的な工学的挙動の把握につとめた。

第1節では、ヘドロの調査と採取方法を明らかにし、特にヘドロの浮遊層の決定は、200 KHzによる音波測深と重錘による測深との間に設定されうることを述べた。さらに、ここで用いた大阪ヘドロの採取方法を説明し、それがこの浮遊層を対象としていることを示した。

第2節では、超軟弱粘土の組成を解明すべく、有機成分・無機成分・界面成分とにわけてそれぞれ検討したものである。まず有機成分については、有機物総量ならびに有機成分官能基組成とをそれぞれ重クロム酸カリ法、赤外線吸収スペクトル分析とで示し、含有される有機成分の反応性を明らかにした。無機成分については、粘土鉱物組成と全体の構成元素とを示した。含有粘土鉱物はX線回折・電子顕微鏡分析などを中心に実施して、定性ならびに定量（簡便法による）を行って、用いた大阪ヘドロではカオリン系粘土鉱物が卓越して存在することが知られた。さらに界面成分は、遊離イオン・吸着イオン(塩基置換容量など)を検討することによって、表面活性の程度を明らかにした。カオリン系粘土鉱物が主なるものにもかかわらず、CECが相当高く、含有されている腐植酸の高い活性によるものと結論できる。以上の検討から、超軟弱粘土の代表として用いた大阪ヘドロは、沖積粘土の延長線上にあるものの、有機物複合体となっており有機成分との関連が重要なファクターであることがわかる。また著者の用いたこのような物理化学的分析手法は、超軟弱粘土の組成を明らかにするための系統的分析方法として今後とも有効に利用されうるものである。

第3節では、超軟弱粘土の沈降・堆積の挙動について考察した。まず沈降性状に関する諸要因を整理し、これまで比較的なおざりにされてきた土粒子以外の固体、例えば有機物の影響、ならびに土粒子の集合・堆積のメカニズムを取り上げてこれを実験的に検討した。有機物の作用によって形成される団粒は安定な状態にあり、密な堆積を生じさせることが判明した。さらに水中の沈積によって生じる安息角と見かけ団粒径の測定から、これらが沈降時の凝集・分散性と密接に関連していることを示し、団粒粒子と凝集力との大小関係では粒子の積み上がり限界の概略を明らかにした。

第4節では、超軟弱粘土の力学的性質として、物理的性質を過去の報告例を参照して整理し、圧密・強度特性を特に超軟弱条件を考慮して検討した。

ヘドロのような超軟弱粘土の工学的性質は、もちろんローカルに変化が富んでいるから、単に1～2ヶ所のデータによって全体を結論することは到底不可能である。図1～2に示したような各地域からのヘドロを精査することによって総合的に評価しうるものである。

最後に、ここで取り扱った超軟弱粘土の挙動は、全体としての巨視的特性を中心にしたものであるが、その物理化学的な性質を究明するためには粘性土の微視的構造との関連からの視点を欠

くことができないと考えられる。よって第3章にあっては、粘性土の粒子配列と団粒化機構、及びその変形挙動に着目した微視的考察の結果を述べるものである。さらに本章の検討の過程において超軟弱粘土中の有機成分が土性に種々の影響を及ぼしており、特に粘土粒子を団粒化させていることが知られ、団粒化作用は超軟弱粘土の安定処理として1つの有力な手法であると予想される。そこで第4章において、有機物の種類と量によって工学的性質がどのように変化するか、あるいは変化させうるかを検討し、人為的な有機物による超軟弱粘土の安定処理として微生物による生化学的処理を考察するものである。

参 考 文 献

- 1) 嘉門雅史：ヘドロの工学的性質について，土と基礎，26巻，1号，1978，pp.19～24.
- 2) 運輸省第二港湾建設局編：東京湾環境改善調査報告書，1976，pp.1～99.
- 3) 奥村樹郎，梅原靖文：海底浮泥の基本的性質，土と基礎，26巻，1号，1978，pp.25～32.
- 4) 松尾新一郎，嘉門雅史：物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について，土木学会論文報告集，209号，1973，pp.103～113.
- 5) 大阪府堺港湾事務所編：堺航路浚渫工事の問題点と浮泥調査について，1967，pp.93～118.
- 6) 粘土ハンドブック編集委員会編：粘土ハンドブック，技報堂，1967，pp.432～436.
- 7) Johnson, L. J., Matelski, R. P. and Engle, C.F. : Clay Mineral Characterization of Model Soil Profiles in Several Pennsylvania Counties, Proc. Soil Scie. Soc. Amer., Vol.27, 1963, pp.568～572.
- 8) 服部共生，古川久雄，川口桂三郎：タイ国水田土壌の粘土鉱物にかんする2，3の考察，東南アジア研究，3巻，3号，1965，pp.151～160.
- 9) 須藤俊雄：粘土鉱物，岩波全書178，1953，pp.181～188.
- 10) van Olphen, H. : An Introduction to Clay Colloid Chemistry, John Wiley & Sons, 1963, pp.1～29.
- 11) 嘉門雅史：超軟弱粘土の堆積と圧密，超軟弱粘土に関するシンポジウム発表論文集，1977，pp.19～24.
- 12) Lambe, T. W. : The Structure of Compacted Clay, Proc. ASCE, Vol.84, SM2, 1958, pp.1654-1～33.
- 13) 大同淳之：粘土を多量に含む流体の粘度と降伏値，第15回水理講演発表論文集，1971，

pp.1～6.

- 14) Diamond, S. and Kinter, E. B. : Surface Areas of Clay Minerals as Derived from Measurements of Glycerol Retentions, Proc. 5th Nat. Conf. Clays and Clay Minerals, 1956, pp.334～347.
- 15) 松尾新一郎, 嘉門雅史 : 超軟弱粘土の挙動について, 第12回土質工学研究発表会講演集, 1976, pp.129～132.
- 16) 西野操, 荒川正文 : 液体中における粉体の安息角, 材料, 19 卷, 201 号, 1970, pp.560～564.
- 17) 中田邦夫 : ヘドロ, 土と基礎, 18 卷, 9 号, 1970, pp.43～44.
- 18) Peynircioglu, A. H. : Performance of Very Soft Muds under Very Light Loads and Consolidation of a Muddy Bottom under a Wide Sand Fill, Proc. 8th Int. Conf. SM & FE, Vol.2.2, 1973, pp.159～163.
- 19) McConnachie, I. : Fabric Changes in Consolidated Kaolin, Geotechnique, Vol. 24, No. 2, 1974, pp.207～222.

第 3 章 超軟弱粘土の工学的性質に関する微視的考察

3.1 土構造の定義とその研究の意義

3.1.1 土 構 造

超軟弱粘土の工学的性質に関する微視的考察として、ここでは特に土構造に重点を置いて、微視的構造の工学的性質へ及ぼす影響の観点から明らかにしようとしたものである。

粘性土の物理化学的な性質の究明ならびにそれに基づいた土の応力-ひずみ関係の確立が、多種多様な土質工学上の諸問題の解決のための重要な課題となっている。そしてそのうちでも粘性土の構造については、粘性土の挙動を決定するものであるから特にその解明が望まれるところである。

粘性土の構造に関する研究は古く、Terzaghi, Casagrandeの時代にさかのぼることができる。初期の構造は単に巨視的な意味での粒子の配列であったが、物理化学理論の進展に伴って電気化学的特性を加味した粘性土の構造が議論されるようになった。しかしこれらはあくまでもモデルであり、実際の粒子配列を直接的に示したものではなかった。ところが近年分析技術の飛躍的な発展によって、きわめて微視的な考察が各種の手段を用いて目に見える形で現出してくるようになり、粘性土の構造に直接アプローチするような研究がなされつつある。そしてこれまではブラックボックスとして残され、粘性土の力学的挙動のうち説明のつかない部分はすべて土構造に起因するとされていたものが、徐々に明らかにされてきている。¹⁾

ところで土構造とは、「種々の粒径をもった土粒子が境界条件と初期条件との差によって、過去に受けた物理的・物理化学的作用力の結果としての粒子の配列を示すもの」と定義される。以上の定義から、現在の土構造を理解することによって、過去に経てきた環境と今後のその土の挙動とをある程度推定することが可能になりつつある。

一方、土構造に対する上記の考え方に対し、Ларионов (1966)²⁾ に代表される土木地質学的な定義がみられる。これは、「地盤構成の諸特質を用いて、すべての地盤をあるシンボルによって統一的に表現したもの」である。そこでは表現の基礎となるファクターとして、

(a) 土の起源、(b) 土の多分散性、(c) 多成分性、(d) 多相性、(e) 多鉱物性、(f) 人工的及び自然的な変動性、(g) 物質配分の不均等性、(h) 熱力学的条件の多様性

などに着目して、これらすべてを取込んだ形でのシンボルの作成を試みている。これは現在一応の成功を収めているようであり、地盤を全体的に理解する意味で有用である。しかしながらシンボルがあまりに複雑になりすぎ、土の分類という観点を越えるものではないと思われる。

さきに述べた土の構造が、土粒子の幾可学的配列と粒子間の作用力の結果を示すものという考

え方は、土の微視的構造から土の挙動モデルを構築するものである。よって土の構成式の考え方の合理性を吟味することが可能であって、土の応力-ひずみの経時的变化を示しうるといえるだろう。³⁾全地盤状態を示す構造の考え方を尊重するものの、現状ではこのような立場から粘性土の構造について追求するものである。

3.1.2 微視的構造の研究の意義

粘性土の構造研究に関する問題点を整理するとつぎのようになる。¹⁾

(i) 用語とモデルとの関連性

土構造の用語については、これまで種々のものが混乱して用いられており、それらの統一とモデル化への努力が、構造の系統的な把握のために切望される。

(ii) 研究のための技術と手法

微視的な考察を行うにあたり、最も合理的な試料調整の手法を確立しなければならない。粘性土を取扱うときは特にその粘土-水系の重要性は論をまたないが、分析上必要とされる水分除去についてはそのときの試料の正当性の議論が必要である。

(iii) 定量的な把握

巨視的な力学挙動への結節点として欠くことができない。最近では形態的な観察例について多くの情報が蓄積されつつあり、これらの結果の定量的な表現手段を確立して応力-ひずみ関係を説明づけることが肝要である。

(iv) 土質安定への応用

(i),(ii),(iii)のプロセスを経ることによって、土の構造の変化を土質安定効果の指標として取り上げることが可能である。各種土質安定工法の正当性、有効性の判定手段として、物理化学的方法、土の構造の観察などの手法に着目し、第4章以降でそれらについての展開を行うものである。

土構造の研究の目的と意義を土質力学・土質工学の中で位置づけたものが図3-1である。

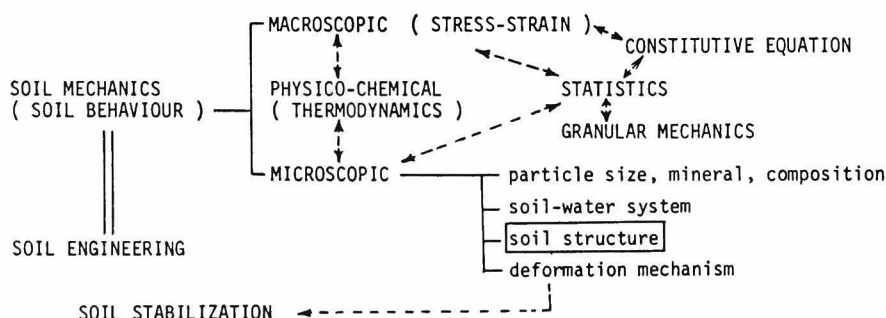


図3-1 構造研究の位置づけ

巨視的な挙動に対応して、物理化学的及び電気化学的な粒子間作用力の結果としての微視的構造特性を本章で取り扱うものである。

3.2 土構造のモデル

3.2.1 土構造の用語

粘性土の構造については、以下の3項目に関する用語がそれぞれの場合に応じて用いられている。

- 基本単位 (Basic Unit)
- 基本モデル (Basic Model)
- 実体モデル (Actual Model)

これらのそれぞれについての区別を明確にして使いわけることが、用語の混乱をなくす意味で肝要であると考えられる。よって本節では上記の各項目について過去の研究経過をとりまとめるものである。

3.2.2 基本単位

粘性土の構造を構成する最小の単位のことである。

著者はこれまでの走査型電子顕微鏡を中心にした土構造の観察、および内外の研究者らの報告に基づいて、つぎのような基本的立場をとっている。すなわち、粘性土の微視的構造は板状粒子が単独で存在することはほとんどなく、程度の差はあっても凝集した団粒によって形成されている。さらに粘性土の粒子間の接触は結合水をも含めた意味での固体接触であり、ランダムな場合でも水中に遊離して存在することは考えられない。ところで上記の「程度の差をもつ団粒」こそが土構造の分散性、あるいは綿毛化性などを左右するものである。よってこの粘性土の団粒（凝集体）を最小の単位とみなすことができる。しかるにその表現としては、ドメイン・フロック・ブロック・クラスター・アグリゲート・パケット・アッセンブレジ・ベッドなどの術語が用いられている。これらの術語はもちろんそれぞれニュアンスの差をもち、場合に応じて用いられているものの、厳密な定義づけをされないで用いられることが多く、用語に混乱をきたしているようである。その原因としては、結局のところたくさんの術語がありすぎることにつきるであろう。そこでこれらを整理する意味で、粘性土の構造を構成する基本単位として、団粒（凝集体）についてはベッド (ped) を、そのまわりの間げきについてはポア (pore) をそれぞれ用いることを提案した。⁴⁾

ベッドとポアの対応関係は表3-1のとおりである。大きく分類する場合にはマクロベッドとミクロベッドの2つで充分のときもあり、YongとSheeran(1973)⁵⁾によれば前者のみをベッド

表 3-1 ペッドとポアの定義

macroped	($> 50 \mu m$)	by naked eye and spy glass
	macropore($> 10 \mu m$)	
mesoped	($2 \sim 50 \mu m$)	by optical microscope
	mesopore($1 \sim 10 \mu m$)	
microped	($0.1 \sim 2 \mu m$)	by scanning electron microscope
	micropore($0.01 \sim 1 \mu m$)	
submicroped	($< 0.1 \mu m$)	by transmission electron microscope
	submicropore($< 100 \text{ \AA}$)	

とし、メゾペッドをクラスター、マイクロペッドをドメインとしているが、簡略化のためには表のようにして統一的に表現しうるものである。なお、サブマイクロポアには土粒子内間げきをも含めている。

以上のように基本単位を定めると、ペッドは物理化学的な力の作用する上限の単位とみなすことができる。そしてペッド内部では安定状態に至り、ペッド間においては単に機械的な力のみが作用すると仮定することができる。なお外力によるペッドの変形は許し、ペッド中のポアの変化は物理化学的な力の平衡に依存するものとする。ペッドとポアの変形挙動については定量的表示とも関連して、3.5で詳述する。

3.2.3 基本モデル

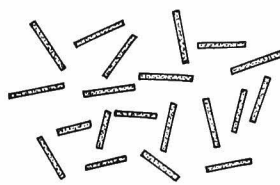
前項で規定した基本単位の配列の程度を表現するものとして基本モデルがある。これは周知のように以下のようなものである（例えばYongとWarkentin, 1966）⁶⁾

- ・ランダム構造 (random structure)
- ・綿毛化構造 (flocculated structure)
- ・分散構造 (dispersed structure)
- ・配向構造 (oriented structure)

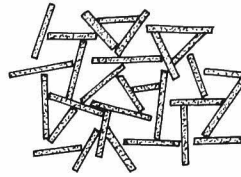
図3-2に示したとおりである。これらのうち、配向構造は粒子の配列が1つの方向にならんだものをさし、そのならび方の程度によって完全配向、不完全配向などと表現することになる。そのため土構造を1つの状態量とみなす場合、基本モデルとなりえないとする見方もあるが、上記の分類はこれまでの慣習に基づいて示したものである。

さらに構造の基本モデルではないが、粒子の配列接触を示す術語として、粘土粒子の板状性あるいは極性状態に着目して、

- ・面一面接触 (face - face contact)



(a) random structure



(b) flocculated structure



(c) partly-oriented structure



(d) oriented structure

図3-2 基本モデル

- 面一端接触 (face - edge contact)
- 端一端接触 (edge - edge contact)

の3つがある。これらはあくまで2つの粒子の接触の仕方を説明しているにすぎないが、面一端接触が卓越するのが綿毛化構造であり、面一面接触の場合は分散あるいは配向構造である。

このような基本モデルは主として単一種類の粘土鉱物から成るような場合について適用されるが、一般の粘性土は多種の粘土鉱物と、シルト径、砂径の粒子を含有するものであるから実際にはこれほど単純に割り切れるものではない。

3.2.4 実体モデル

基本モデルを出発点として、一般の自然粘性土の構造を表現するために多くの試みがなされている。過去の研究によって提案されている構造モデルを以下にまとめてみる。これらは必ずしも自然の粘性土の観察からえられたもののみではなく、理想化されたものをも含んでいる。

まず土構造の重要性を最初に指摘したTerzaghi (1925)⁷⁾は、単粒・綿毛化・蜂の巣状構造の概念を示した。特に蜂の巣状構造では個々の粘土鉱物粒子が互いに十分強い力で接触点でくっつきあっているためと仮定している。続いてGoldschmidt (1926)は高鋭敏粘土において粘土粒子が不安定なカードハウス構造をつくり、低鋭敏粘土でより密な安定配列をすることを明らかにした。Casagrande (1932)⁸⁾は蜂の巣状構造が鋭敏な海成粘土で存在すること、さらに隣接するシルト粒子の間の最も小さいすき間にある粘土粒子の配列は高い圧縮性を示し(結合粘土, bond clay)、一方、シルト粒子間のより大きいすき間にある粒子は相対的に圧縮性が小さい(マトリックス粘土, matrix clay)と仮定した。

その後、イオン拡散二重層の理論や希薄コロイド溶液の挙動など、粘土粒子相互間の物理化学

的な作用を考慮に入れてさらに進展がみられた。Lambe(1958)⁹⁾は粘土粒子の堆積時における電気化学的な環境変化による構造の差を示した。これは第2章図2-7に示したとおりであり、(a)海水中のとき；塩分綿毛化構造、(b)きわめて低い電解質濃度（淡水中）のとき；非塩分綿毛化構造、(c)中間的電解質濃度（汽水中）のとき；分散構造などである。ここで、(a)、

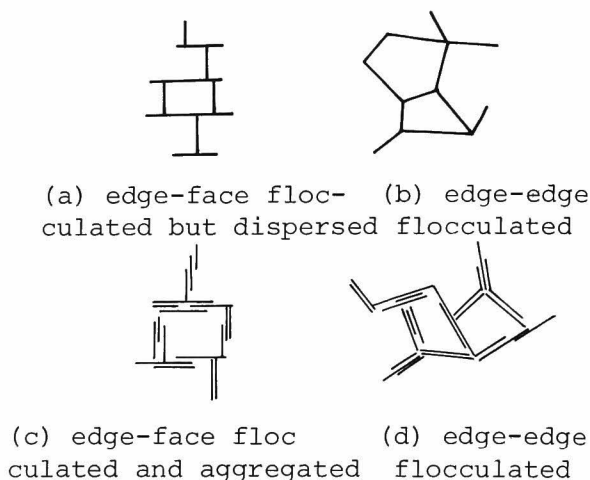


図3-3 粘土サスペンションのモデル

(b)の区別は沈降時の粒子間に作用する電気的な力の差によるもので、海水のように高電解質濃度中では平行化作用が(b)の淡水のときより高く、一部に面一面接触がみられ、段階づけされたオープン配列を作るためであるとされる。van Olphen(1963)¹⁰⁾はコロイド化学的研究から粘土サスペンション中の粒子の種々の様相をまとめ、図3-3のような端一端、端一面接触した綿毛化モデルを示し、いくつかの粒子が面一面接触したものからなっている(c)、及び(d)などにアグリゲートという術語を与えた。

実験室的に準備された単一の粘土鉱物からなる土構造の電子顕微鏡観察から、液相中の塩分濃度のみでなく、粘土鉱物の種類や粘土含有率などによっても影響されることが明らかになっている。SidesとBarden(1971)¹¹⁾はカオリナイト、イライト、モンモリロナイトの分散や綿毛化した試料の微視的構造から、粘土の表面活性が土構造に重要な影響をもつことを示した。またO'Brien(1971)¹²⁾は実験室で準備したカオリナイトとイライトの研究から、粘土含有率が大きくて淡水中のカオリナイトの綿毛化構造と、粘土含有率が小さくて海水中のイライトの綿毛化構造とはほとんど違いのないことを見いだした。こ

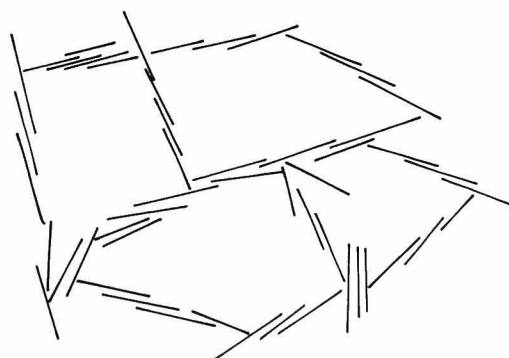


図3-4 階段状カードハウス構造

のときの構造を階段状カードハウス(図3-4)と呼んでいる。SloaneとKell(1966)¹³⁾は締固めたカオリン粘土の観察から、粘土の構造は局所的にみると面一面配向した粒子からなることを示し、この配列を説明するためにブックハウス(図3-5)という言葉を使っている。この観察は、

Smalley と Cabrera(1969)¹⁴⁾ によっても賛同されており、機械的に締固められたカオリンの階段状面一面配列を述べている。Aylmore と Quirk(1959)¹⁵⁾ は伊利ト粘土の観察から、このように面一面配向した一群の粒子が構造中に分散していることを示し、これに多分散構造 (turbostratic) (図 3-6) という名称を与えた。Smart(1967)¹⁶⁾ や Sides と Barden(1971)¹¹⁾ はカオリン粘土中の多分散構造を確認し、これに粘性土の構造の一般化されたものとしての地位を与えている。さらに Smart(1969)¹⁷⁾ は粘土鉱物の集合の程度を評価して図 3-7 のように (a) 重ね合せ, (b) 端部での接合, (c) 相互構造の結合という 3 段階を示し, (c) で最密構造を作ると述べている。

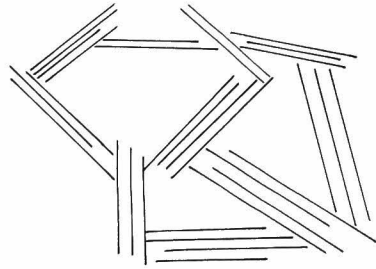


図 3-5 ブックハウス構造

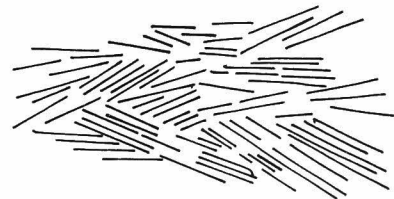
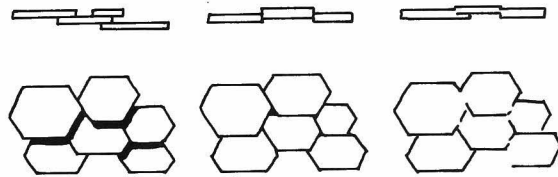


図 3-6 多分散構造

また Yong と Sheeran (1973)⁵⁾ は粒子が一般的にベッド状で存在し、単一粒子の相互作用は重要でないことを強調している。



(a) overlapping (b) bonding (c) intergrowth

図 3-7 集合のタイプ

これらの構造モデルは板状粘土粒子の 2 次元的モデルであるが、Tan(1957)¹⁸⁾ は粘土粒子のネットワークの概念を 3 次元的に描いて高く評価された。さらに Pusch(1970)¹⁹⁾ は種々の粒径の粘土粒子の接触モデルを図 3-8 のように示し変形機構の観点からの説明も加えている。

以上のモデルは実験室的に準備された単一鉱物からなる粘土の構造である。しかるに、自然に堆積した粘性土は、その堆積期間中に作用する数多くのファクターの複雑な相互作用を受けており、特に粘土の量、鉱物種、液相の電解質濃度、堆積の速度と経過時間などが考えられ、特別な考慮を払う必要がある。

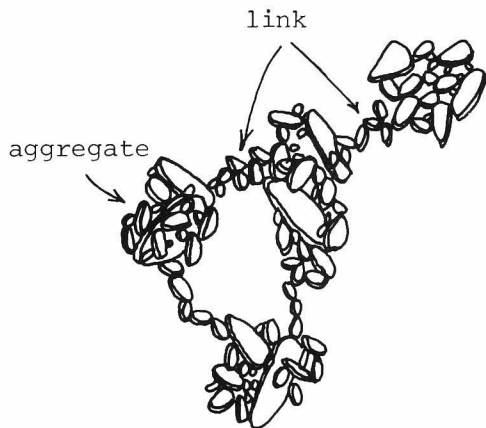


図 3-8 立体構造モデル

Rosenqvist(1959)²⁰⁾によれば透過型電子顕微鏡を用いたオスロ粘土の観察から、カードハウス構造の存在を実証したが、最近の走査型電子顕微鏡を用いた広範な観察によって、単一粒子での相互作用は極端にまれであり、ベッドを形成しているものとされている(BardenとSides, 1971²¹⁾, 松尾と嘉門, 1973⁴⁾)。Emerson(1959)²²⁾は土壌学の立場から、1次鉱物や有機物を含む構造モデルを図3-9のように示し、粘土鉱物が結合剤として作用していることを明らかにした。Pusch(1973)²³⁾はスカンジナビアの沖積粘土において、粘土粒子はベッドを作り微細な板状粘土粒子の鎖でつながれており、

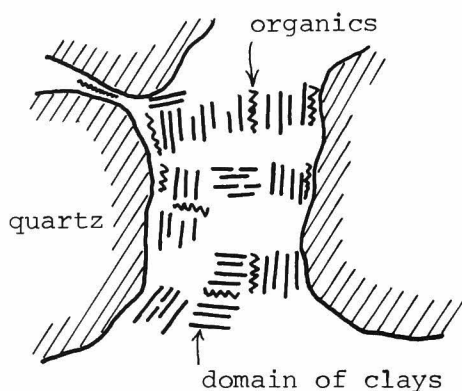


図3-9 土壌の集合モデル

海水中で堆積した粘土は密でかつ大きいベッドを作り大きい間げきをもっている。一方淡水中の粘土の堆積は相対的に内部間げ



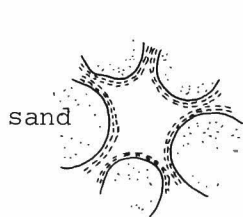
(a) freshwater clay



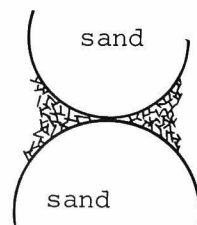
(b) marine clay

図3-10 ベッド配列モデル

きの多いベッドを作りベッド径は小さく、ベッド間の間げきも小さいものであるとしている(図3-10)。このように、粘土粒子の1つ1つを識別することは困難であり、また無意味であり、むしろ不規則に配列してベッドを形成していることにこそ重要性があると指摘されている(Mitchell, 1959²⁴⁾; Bowles, 1968²⁵⁾; McGown, 1973²⁶⁾)。Dudley(1970)²⁷⁾は粒状粒子間の支柱(Buttress)の存在を示し(図3-11)、一般に微細なシルトと粘土とから成り立っていると述べている。図3-12はCollinsとMcGown(1974)²⁸⁾によるものである。これまでの構造モデル



(a) aggregated clay grain arrangement



(b) ring buttress arrangement

図3-11 粗大粒子の表面状況

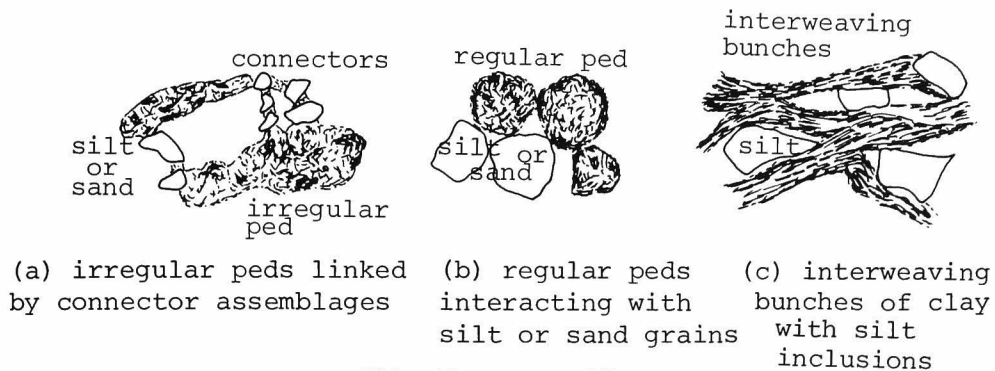


図3-12 ペッドの状態

を整理して広範な種類の粘性土の構造の観察から、出現するパターンを忠実に表わすために基本構造モデルを提示した。図はベッド（アッセンブレージという術語を用いているが）の1つ1つの境界が不明瞭な場合の構造表現に適しているようである。

土の構造のうち間げき空間の特性については、その径や形状、方向性などに関して取り扱われており、これらの特性に応じて分類されている。間げき径の分布の測定や分類は、Brewer(1964)²⁹⁾、Lafeber(1965)³⁰⁾、Ларионов(1966)²⁾、CollinsとMcCown(1974)²⁸⁾、McConnachie(1974)³¹⁾、Smart(1975)³²⁾、Yong(1975)ら³³⁾によって実施されている。これらは間げき空間が土構造の境界を形成し、ベッドと密接に関連するゆえに分類の必要性が強調されるものである。

以上のような構造モデルは、粘土・シルト・砂分の集合体としての粘性土の、ある特定の部分における構造形態を説明したものである。これらはあくまで定性的なものであって、土の力学的条件と直接結びつくものではない。よって3.1で述べたように、土の力学的挙動を微視的な考察から説明するためには定量的な表現が望まれている。それには構造モデルの単純化によって全体を網羅するように努める必要がある。

3.3 研究のための手法について

3.3.1 研究機器とその適用性

従来から取組まれている多くの土構造に関する研究では各種の手法が駆使されてきた。各研究機器の利用の適否は微視的考察のオーダーの相違や着目する範囲等に基づいて検討されるべきである。

最近では徐々に淘汰されつつあり、主なる研究機器としては土構造を直接識別しうる電子顕微鏡や、分析面の全体情報を容易に得ることのできるX線回折などがあげられる。土構造判定のための代表的な分析機器について、その適用性を比較検討したものが表3-2である。本研究においては主要分析機器として走査型電子顕微鏡を用いたが、以下にその原理と機構を簡単にふれて

表 3-2 土の構造判定のための代表的分析機器の比較

	電 子 顕 微 鏡		X線回折	偏光顕微鏡	ポ ロ シ メーター	そ の 他
	走 査 型	透 過 型				
応 用 原 理	電子線による直接観察 波 長：0.12~0.04Å 加速電圧：5~150KV 分解能50Å 倍率×10 から可能	電子線による直接観察 波 長：0.12~0.04Å 加速電圧：5~150KV 分解能2Å 倍率×500,000 程度まで 可能	X線の回折 強度を利用 する 波長：10~ 0.1Å	可視光線の 偏光度を利用 する 波長：200 μm 倍率×300 程度まで 可能	水銀等の圧入、圧入圧力 p と表面張力 γ 、接触角 θ の係数を利用した間げき d の測定 $d = -\frac{4\gamma\cos\theta}{p}$	音波、誘電率、電気伝導度、熱伝導度、磁気などによる異方性の測定
粒子の形状判定	可 能	5 μm 程度の粒子以下は可能	不可能	シルト径粒子以上は可能	不可能	不可能
粒子の大小観察	可 能	5 μm 程度の粒子以下は可能	不可能	シルト径粒子以上は可能	不可能	不可能
粒子の配列の判定	可 能	可 能 水分を保持したままでも可能の場合がある	可 能 定量的な扱いが容易	可 能	不可能	可 能
間 げ き の 判 定	粒子間または粒子内間げき	粒子間または粒子内間げき	不可能	粒子間の間げき	可 能 間げき分布を決めうる	一部可能

おきたい。

走査型電子顕微鏡はKnoll(1935)によって考案され、戦後特にCambridge大学のグループにより研究開発された。³⁴⁾ その原理は電子線を集束して電子プローブを作り試料面上を走査させ、図3-13に示すような試料内から出てくる情報（反射電子、2次電子、特性X線、散乱電子、吸収電子、その他）を捕捉し増幅して、これをブラウン管上の走査と同期させることによってCRT像あるいはTV像として観察するものである（図3-14 参照）。

走査型電子顕微鏡は従来の透過型電子顕微鏡と比較して、焦点深度が大きく、立体観を持った像がえられ、試料面上の走査範囲も広く、供試体の作製が容易であるなど数々の利点を有している。本研究に用いた走査型電子顕微鏡は日立製作所SM-2型、明石製作所MSM-102型である。

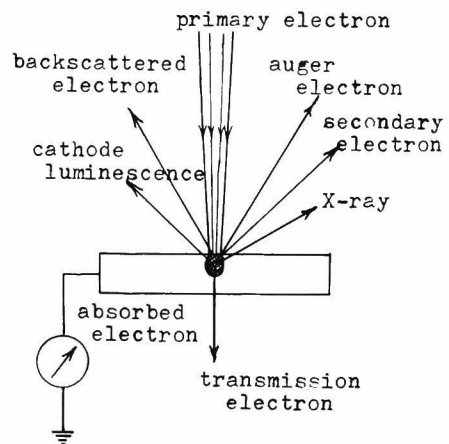


図 3-13 試料からえられる情報

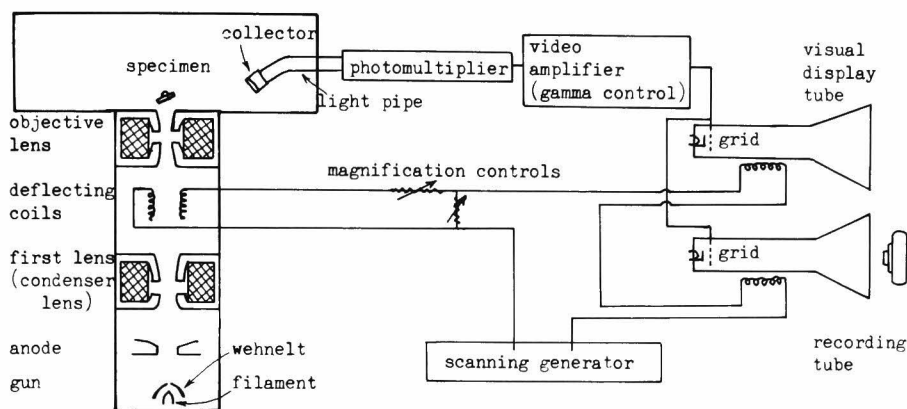


図 3-14 走査型電子顕微鏡の模式図

捕捉情報は2次電子を中心としているが、MSM-102型はその他に特性X線を $S_i(L_i)$ 半導体検出器の連結によって解析し、X線マイクロアナライザーとして元素分析も可能となるようにグレードアップされている。これは特に第5章における多価カチオンによる安定処理機構の究明にその偉力を発揮するものである。

3.3.2 試料作成における問題点

分析機器を用いた微視的構造研究にあたっては、分析に至るまでの試料の調整方法に種々の問題点を包含しており、構造解析があくまでも試料の不攪乱状態での分析であるという前提から、これらに対してあらかじめ対策を講じておかななくてはならない。

問題点としてつぎの3点があげられる。

- 分析のための試料のサンプリング過程
- 試料中の水分除去過程
- 分析表面の作成過程

以下にこれらの問題点を整理し、その解決の方策を述べる。

(1) 分析のための試料のサンプリング過程

応力履歴を経ること、特に応力解放に伴う膨張を避けえない。地盤のサンプリングによる応力履歴はLaddとLambe(1963)³⁵⁾によって図3-15のようなストレスパスをとることが示されている。不攪乱試料といえどもこのような乱れを受けているものである。構造分析用の試料は室内試験装置中から得ることが多いが、このときは図3-16のような経路となると考えられる。しかしながらこれら過程での構造変化は以下の3つの理由からほとんど無視しうるものとされている。

- (i) 粘性土にあっては除荷に伴う体積変化量は相対的に微小であり、弾性変化とみなしうる。
- (ii) すべり面等の破壊後の観察の場合では、形成される破断面をそのまま検鏡試料とするので

応力履歴の影響を無視しうる。

(iii) 载荷状態で試料中へ固化剤を注入して構造を固定化することは、粘性土試料ではほとんど不可能である。

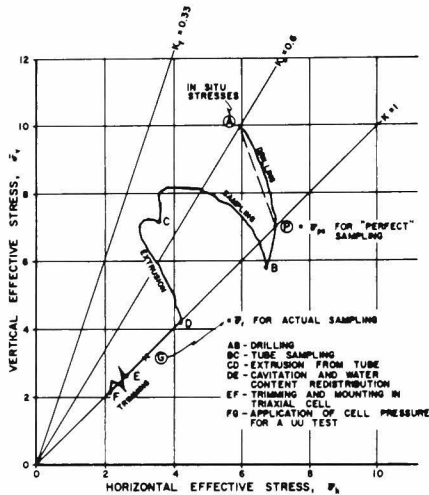


図3-15 サンプリングによる応力履歴

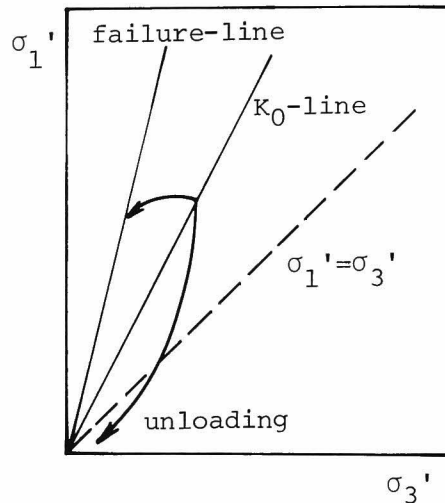


図3-16 供試体作成のため K_0 状態からの除荷時の履歴

(2) 試料中の水分の除去過程³⁶⁾

分析のためには不可避免的に水分の除去（乾燥）過程が入るものである。ところが土試料は水分を含んだ状態で存在し、特に粘性土にあっては粘土粒子と水との相関こそが重要なファクターである。このような観点から含有水分の除去について種々の方法が検討されている。

(i) 自然乾燥法、炉乾燥法—試料の含水比状態に依存して体積収縮量は大きく、構造の乱れは著しい。炉乾燥法の方は急速に乾燥させるため試料の表面部分の乱れは大きい、外部が殻となって内部の構造を保存する効果があるとされている。また不活性粘土では影響は少なく最大8%程度である。

(ii) 凍結乾燥法—試料を凍結し低温真空乾燥を行う。新たに開発した手法は、まず試料に溶媒置換を実施する。その順序は水→メチルアルコール→アセトン→イソペンタンである。このようにするのは試料溶液の表面張力と沸点を下げるためである。そして最後のイソペンタン液中に試料を保持し、これを液体窒素によって -130°C まで冷却する。その後あらかじめ同様に冷却しておいた凍結乾燥台上に試料を置き、低温真空中でイソペンタンを昇華させる。このような方法では試料と液体窒素とが直接には接触しないから、冷却時に発生する窒素ガス膜によって生じる氷の結晶による乱れは除去されている。用いた装置の略図は図3-17のとおりである。試作した凍結乾燥台の特徴は、①断熱膜による熱伝導の防止、②台重量を大にして熱容量を高めている、③

乾燥後の温度コントロールをヒーターに行い、試料取り出し時の温度勾配をなくして試料表面への結露を防止することができる等である。

(iii) 臨界点法—これは物質の臨界点、すなわち気相・液相・固相の3相状態条件下で乾燥するものである。水の臨界点は圧力225気圧、374℃であるため、通常は炭酸ガス（臨界点73気圧、31℃）までの溶媒置換を行っている。そのためにはエチルアルコール→酢酸アミル→液化炭酸ガスへの置換を必要としており、

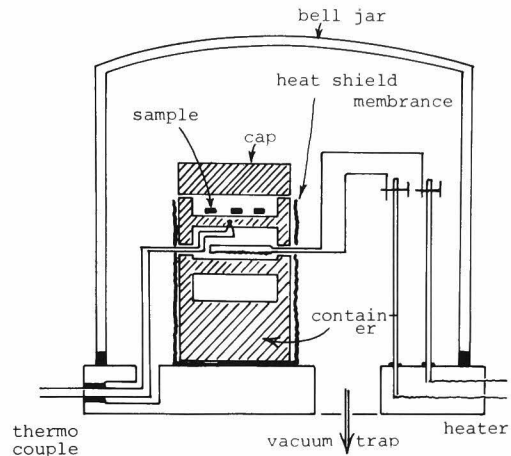


図3-17 凍結乾燥装置（昇華プロセス）の概要

かつ昇華時の圧力の高さから構造の乱れが避けえない。

(iv) カーボワックス置換法—湿潤試料を60℃に融解させたカーボワックス（ポリエチレングリコール、重合度6000程度）溶液中に浸し、水分の置換と固化を行う方法である。粘土中の水分が完全にカーボワックスと置換するために要する時間は、粘土試料の大きさや含水比によって異なるが、1～2週間と相当長時間であること、カーボワックスの再結晶化に伴って構造が変化することなどから問題点の多い手法である。

上に述べた4つの水分除去法を場合に依じて使い分ける必要があるが、粘性土の構造を破壊することなく含有水分を除去する最良の方法は凍結乾燥法であると考えられ、本研究でもこの手法を主として用いている。

(3) 分析表面の作成過程

分析のための表面を切り出す必要がある。せん断破壊後のすべり面観察など、既に表面がえられている場合を除いてナイフ等で切り出すとか、破断面を人為的に与えるとかしなければならぬ。この時ももちろん構造は乱れるものであるが、これを極力防ぐために、

(i) ピーリング（Peeling）操作を施す（接着テープで作成表面を50～100回ひきはがし、乱れた部分を取り去る手法であり、これにはテープのかわりにゼラチンを用いても場合によっては良い結果を得た）

(ii) ポリッシング（Polishing）による（電気化学的または研摩材で機械的にみがくなど）

(iii) エッチングによる

などの方法がある。

本研究では(i)の手法を用いているが、他の手法と同様に切断による乱れの領域を判定すること

がきわめて困難である。しかしながら、あらかじめピーリング回数と観察表面との関係を検討することにより、接着テープで50回以上、ゼラチンで3回以上の操作で乱れの要素を相当除きえていることが判明した。ピーリング操作の前後での走査型電子顕微鏡観察像の例は写真3.1, 3.2のようであり、乱れをほぼ完全に除去している。

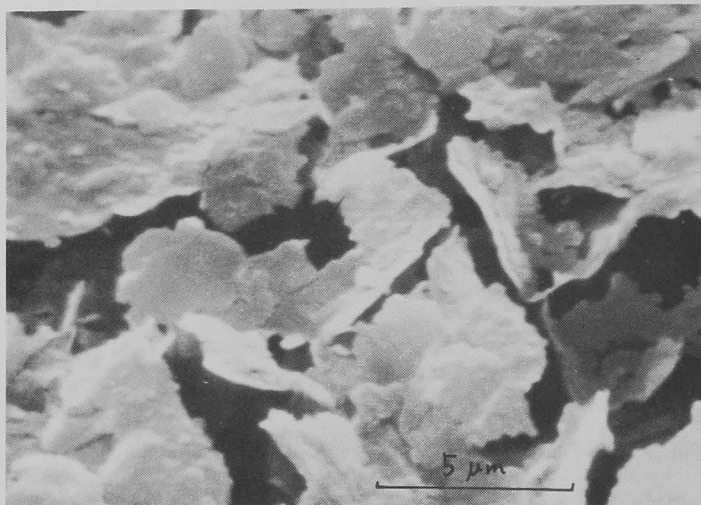


写真 3.1
ピーリング前の試料表面
(大阪南港粘土) ×5000

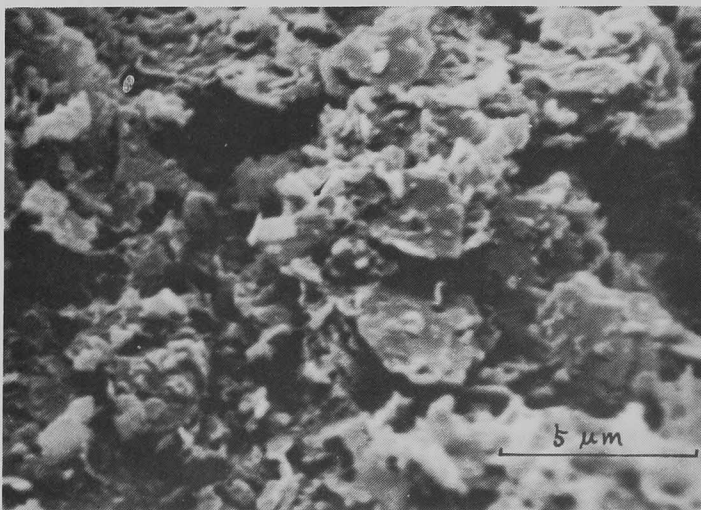


写真 3.2
ピーリング後の構造の現
出 (大阪南港粘土) ×5000

なお、ピーリング後、導電性接着材で試料台にはりつけるが、この接着材（銀ペースト）は写真3.3のような物質であり、板状粘土粒子との混同という初歩的ミスを避ける必要がある。

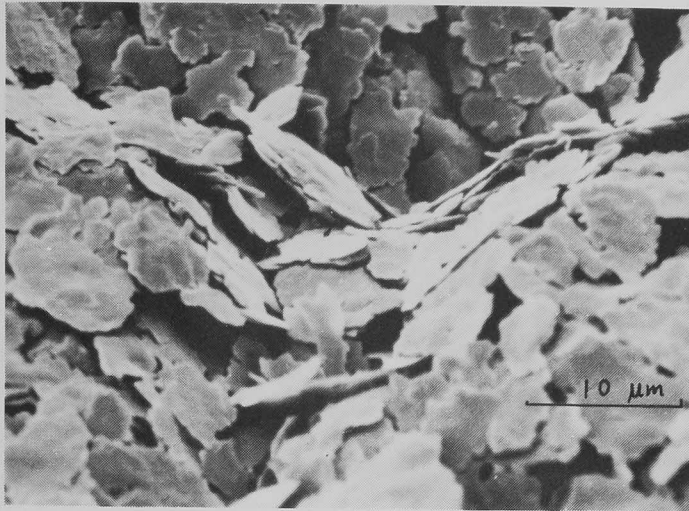


写真 3.3
導電性接着材の状態 ×2000

3.3.3 用いた試料作成法

前項で試料作成上の種々の問題点とその解決法について述べたが、本研究に用いた試料作成法を走査型電子顕微鏡用試料についてまとめて示すと図3-18のような流れ図となる。

また観察面としては圧密試料について最大主応力面のH-断面、最大主応力方向のV-断面についてそれぞれ検討を行い、せん断破壊後の試料についても上記断面を用い、あわせてすべり面の観察も実施している。なおV-断面については、最大主応力方向が走査型電子顕微鏡の画面の上下方向と常に合致するように調整して観察撮影を行っている。

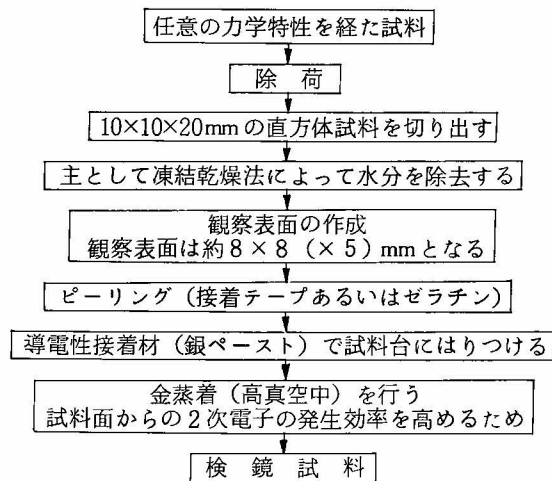


図 3-18 走査型電子顕微鏡用試料作成手順

3.4 微視的構造の観察

種々の力学的な作用をうけた粘性土が、その微視的構造としていかなる表情を示すかという点について明らかにしたものである。いわゆる自然粘性土は、シルト分・砂分の粒子をも含めて多種の粘土鉱物から成り立っている。このために1つの粘性土の、ある力学的作用条件下での特性を代表させるような微視的構造は容易に決定しえない。ここでは種々の条件での様相を示すことによって全貌の把握を行わんとするものである。

力学的作用条件としては、主として圧密とせん断過程を採用している。室内試験におけるスラリー状の練り返しから出発して、側方拘束 K_0 圧密試験を行っている。さらに一部は等体積単純せん断試験を実施した。後者はせん断中に全体としての間げき比が変化せず、また有効応力を直接測定することになるので、圧密時の構造変化とは一応切り離して、偏差応力による構造変化として考えることができるものである。

3.4.1 単一粘土鉱物の微視的構造

粘性土を構成している代表的粘土鉱物として、2:1型のモンモリロナイト、1:1型のカオリナイトをあげることができる。前者は活性粘土鉱物、後者は不活性粘土鉱物の代表である。わが国の沖積粘土中に広く分布するものであるので、自然粘性土の構造を把握するための第1段階として、これらの粘土鉱物が単体として存在する状態での微視的構造をあらかじめ明らかにしておく必要がある。

ところでわが国に産出するこれら単一粘土鉱物はその結晶性があまり良好ではない。特にカオリナイトでは通常六角形板状鉱物といわれているが、電子顕微鏡写真ではほとんど六角形状のものは存在しなく、またX線回折図でも結晶性の悪さのためにピークの発現が良くない。ハロイサイトの混在も多く、そのためにカオリナイト系粘土鉱物という意味のカオリンという名称で市販されている。結晶性の良いカオリナイトとして主にクラウンクレー（米国、南カロライナ州アンケン産； $2\mu m$ 以下に調整されたもの）を用いた。

一方、モンモリロナイトでは泥水工法に用いられることが多いため、比較的良質のものを容易に入手しうる。ベントナイトという名称で市販されている。

以上からここではクラウンクレー（一部市販の国産カオリンを用いた）とベントナイトを選定し、これらを用いて微視的構造観察を行った。

カオリナイトの例を写真3.4～3.9に示している。カオリナイトの板状不定形粒子の001面が圧密の進行に伴って（ここでは $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2$ までであるが）H-断面で比較的良好に観察される。これは載荷に伴う粒子の平行配列の発達を示すものである。V-断面では微小粒子の団粒化によるペッドの形成のためか粒子端部の出現は未発達である。ただカオリン粘土の場合にはブ

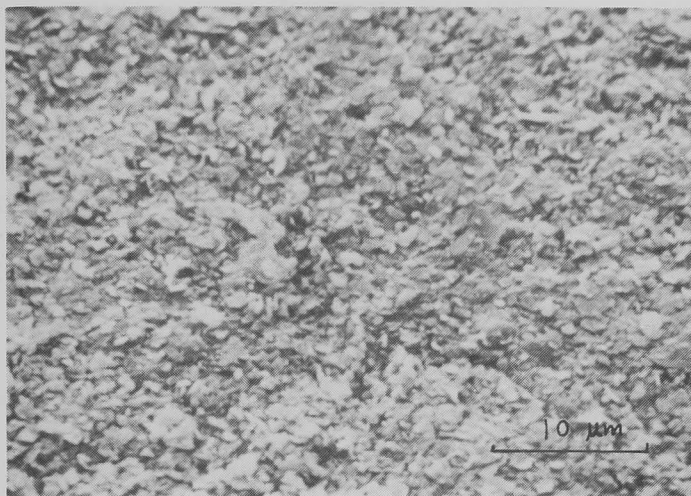


写真 3.4

カオリナイト，圧密H-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$



写真 3.5

カオリナイト，圧密H-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

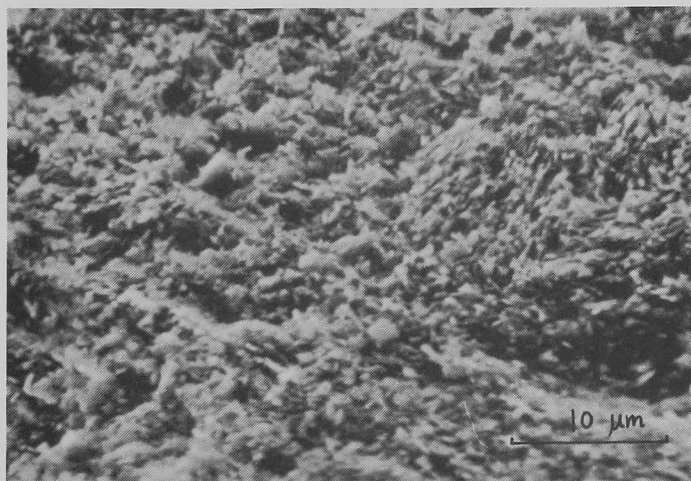


写真 3.6

カオリナイト，圧密V-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$

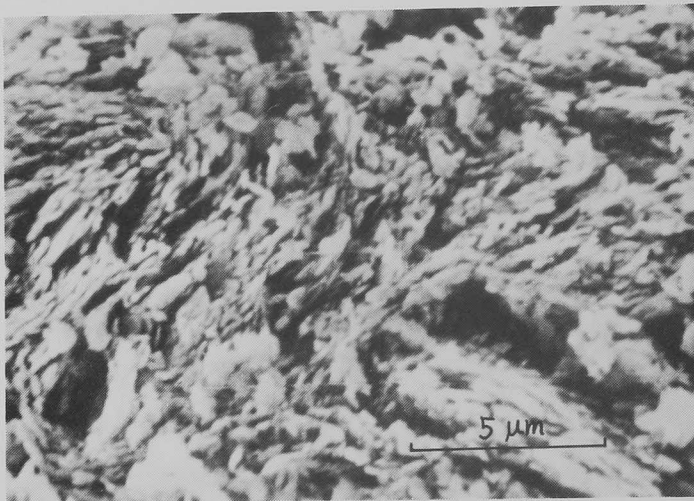


写真 3.7

カオリナイト, 圧密V-断面

$p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

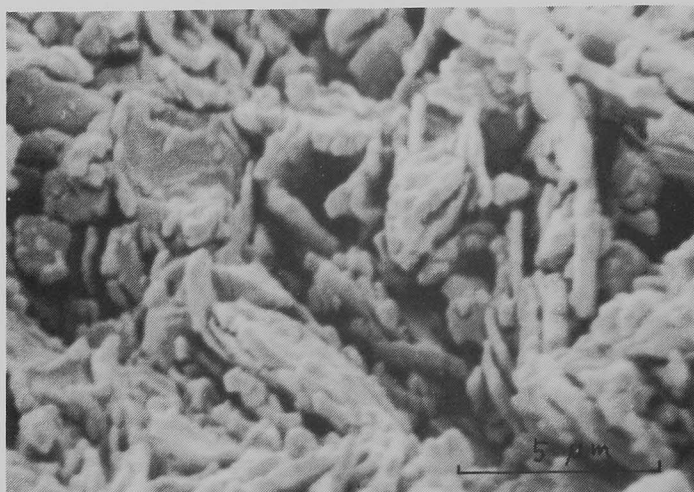


写真 3.8

カオリン粘土, 圧密V-断面

$p=0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

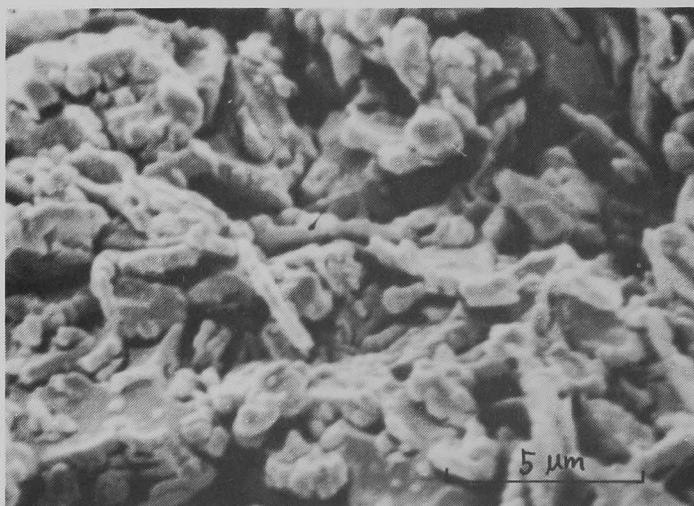


写真 3.9

カオリン粘土, 圧密V-断面

$p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

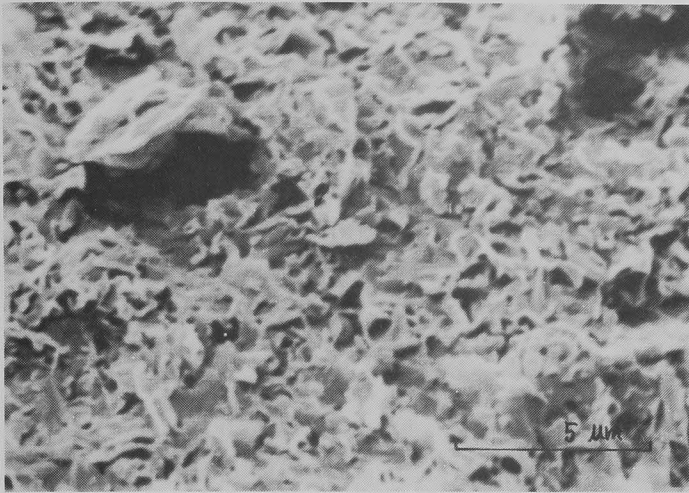


写真 3.10
モンモリロナイト，
圧密H－断面
 $p=0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

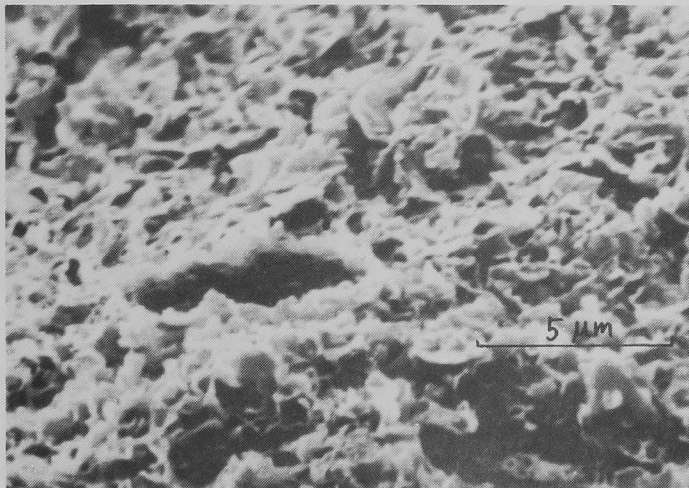


写真 3.11
モンモリロナイト，
圧密V－断面
 $p=0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

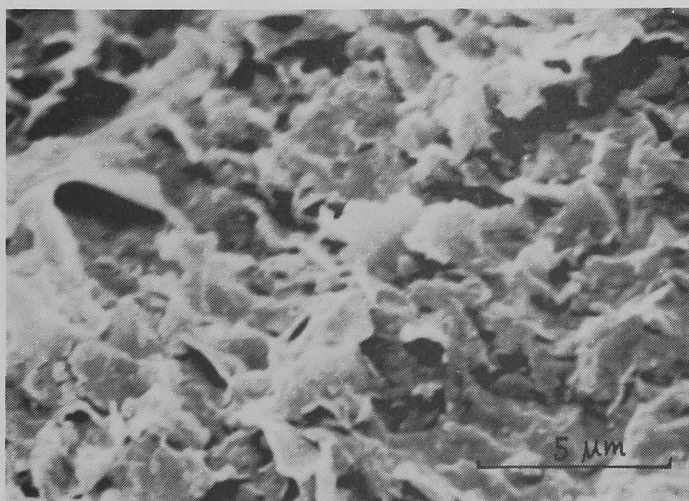


写真 3.12
モンモリロナイト，
圧密H－断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

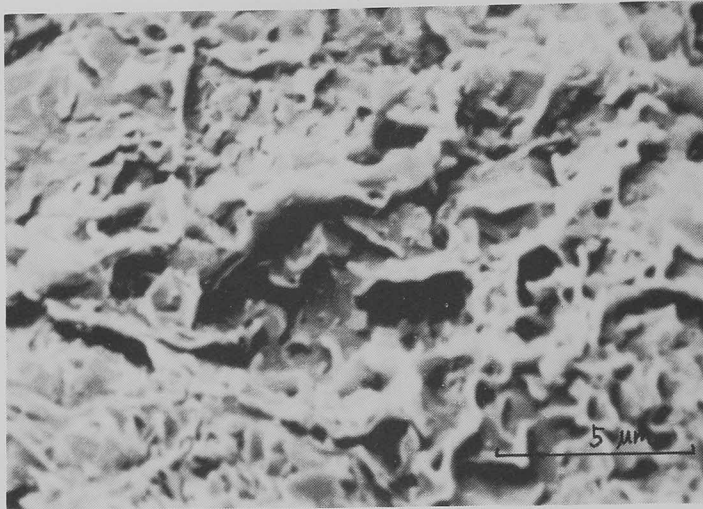


写真3.13
モンモリロナイト，
圧密V－断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

ロック状の発達を観察される。

モンモリロナイトの例は写真3.10～3.13である。モンモリロナイトは、粒子端部でゆがみやまくれあがりが見られ、また一方で視野全体に凹凸のきわめて少ない状況を示し、明確な構造の形成は観察されえない。モンモリロナイト粘土では非乾燥試料を用いた構造研究によるべきであることの示唆ともみられるが、現実には泥水工事に伴う処理土や第3紀層地すべり粘土などを除いて、モンモリロナイトの単一鉱物組成は現場ではほとんど出現しないので、乾燥試料による構造研究を容認しうるものである。

このように、単一粘土鉱物系においても土構造の出現形態は基本モデルに示すような単純なものではなく、カオリナイト系におけるようなベッド化をきたしたブロックとしてのモデルが正統である。次項においては自然粘性土の構造を取り扱うが、ここで述べたような単一粘土鉱物系の構造が、自然粘性土中の粗粒子分を結合させる1種のバインダーとして機能し、ベッド化をもたらすことが予想される。

3.4.2 自然粘性土の微視的構造

自然粘性土として超軟弱粘土である大阪ヘドロや大阪南港粘土を用いているが、その構造観察結果は写真3.14～3.19のとおりである。

これらは界面吸着イオンや有機物の作用によって凝集体（ベッド）を形成している。圧密の進行に伴って定方向を示すようになることが、V－断面の写真から明瞭に観察される。

また生じるベッドの状態を立体的に観察するために、5度の傾斜角面で同一位置を走査させステレオ写真として表わしたものが、写真3.20，3.21である。実体視することによってベッド粒子の奥行をもった観察が可能である。

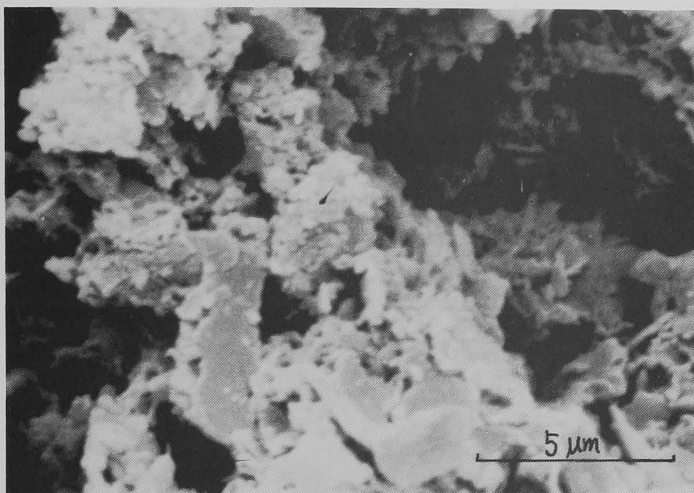


写真 3.14
大阪ヘドロ，圧密H-断面
 $p=0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

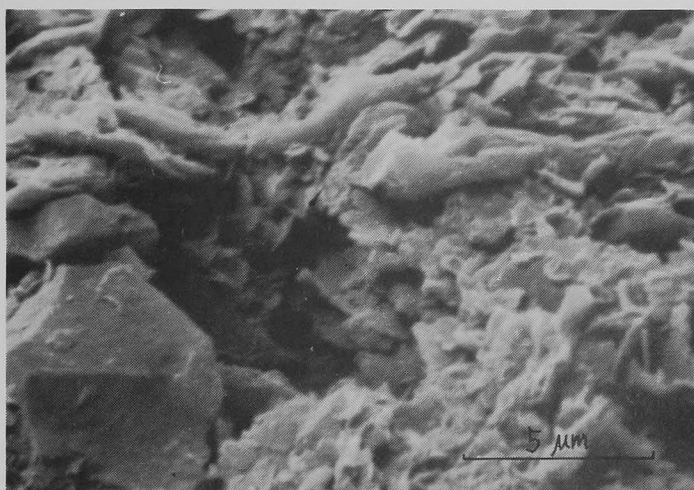


写真 3.15
大阪ヘドロ，圧密V-断面
 $p=0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

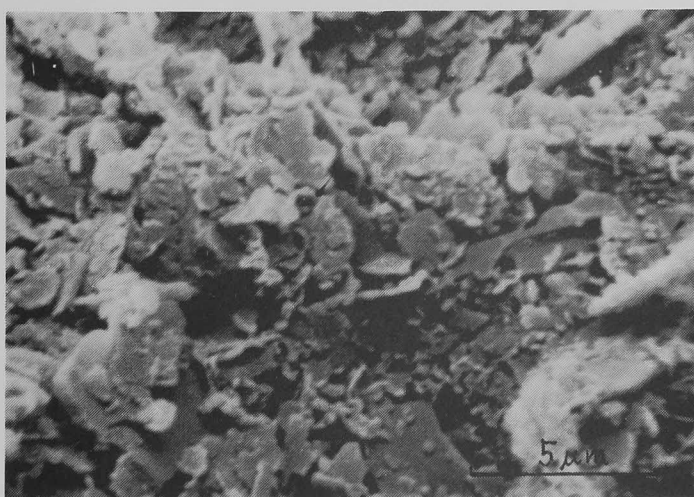


写真 3.16
大阪ヘドロ，圧密H-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

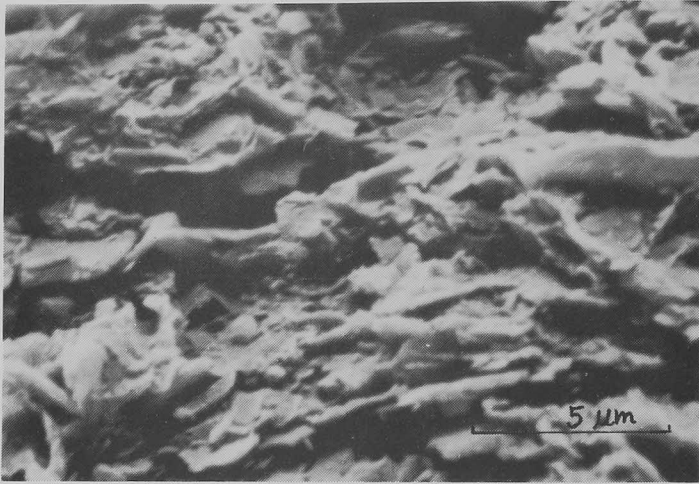


写真 3.17
大阪ヘドロ，圧密V-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

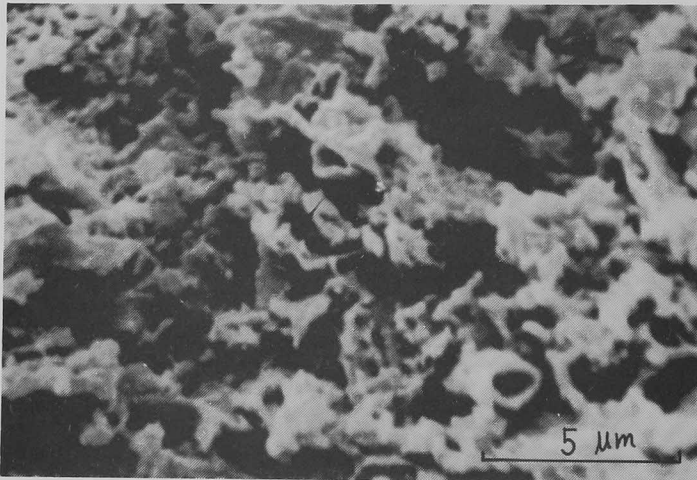


写真 3.18
大阪南港粘土，
圧密V-断面
 $p=0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

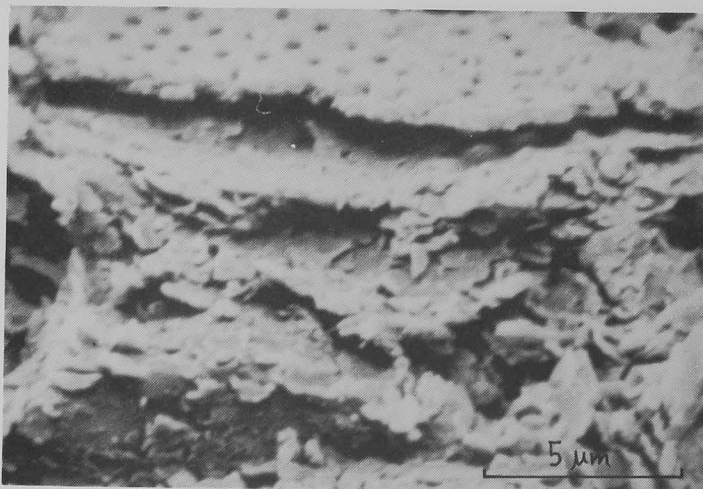


写真 3.19
大阪南港粘土，
圧密V-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

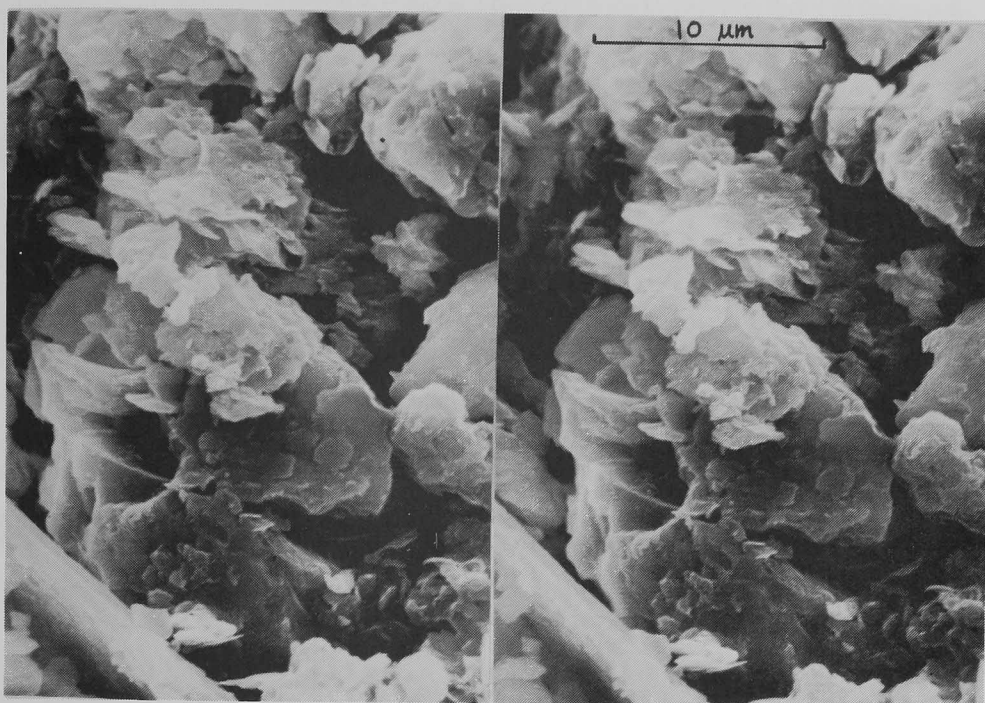


写真 3.20 大阪南港粘土のステレオ写真，圧密 H-断面， $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 3000$

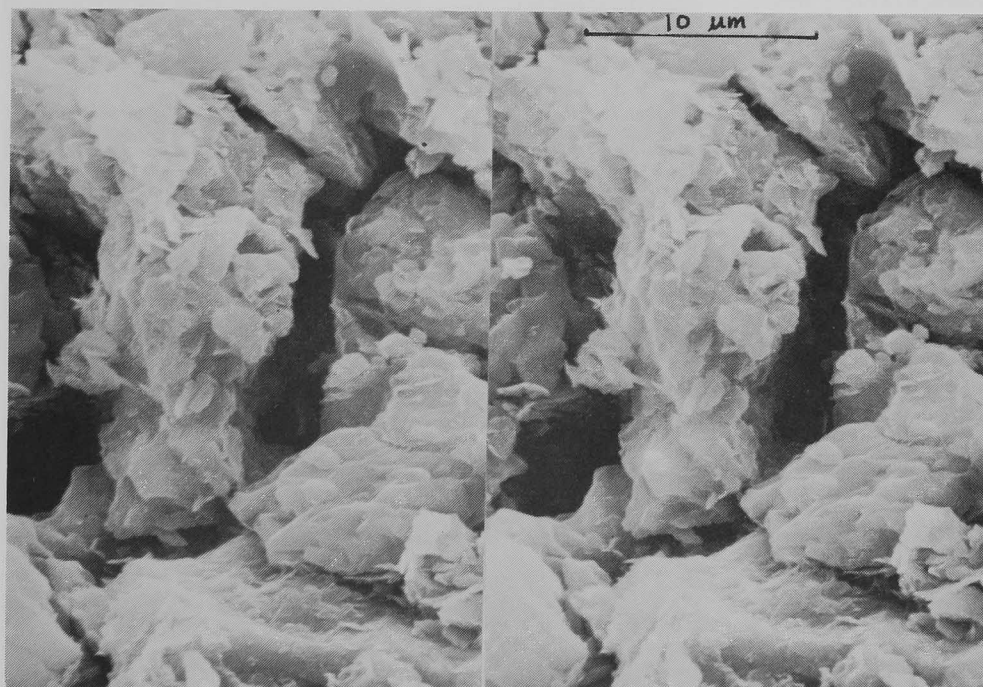


写真 3.21 大阪南港粘土のステレオ写真，圧密 V-断面， $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 3000$

さらに南港粘土の場合特徴的に観察される事項としてボール状物質の配列がある。写真3.22, 3.23 に示されるようにボール状物質（等方晶体であることからパイライト； F_6S の結晶と考えられる）は集合体を作って存在し、H-断面では平面的な広がりを持ち、ボールの各点是有機物で一部接合されている。よってV-断面を観察すればそれらは列状にならんで出現するはずである。写真3.23はこのことを証明しており、このパイライトのボール状物質の配列は逆に圧密供試体のH-断面、V-断面の判定のための1つの基準を与えている。なお、パイライトは臨海部沖積粘土中には一般によくみられ、特殊な例では結晶の生長によって直径が10～30cmに及ぶものも発見されている。

せん断時の構造変化は写真3.24～3.27のとおりである。これはさきに述べたように等体積単純せん断試験（ひずみ

速度0.01%/min～0.06%/min）を行って、せん断破壊させた後のV-断面である。なお、主応力方向はせん断前のものである。試験結果は図3-19であるが、破壊時の供試体は図の e_1, e_2 の状態にある。すなわち、限界状態（限界間げき

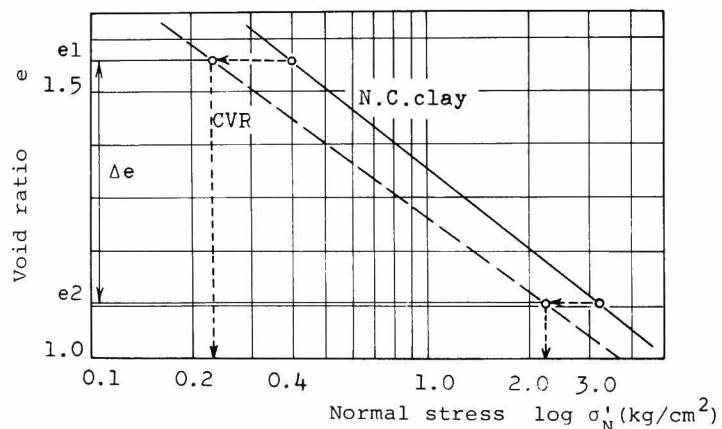


図3-19 せん断時の $e \sim \sigma'_N$ 関係

比）線上にあると考えられる。 e_1 状態から e_2 状態への圧密によって粒子の配向がみられるが、せん断によりその配向が一部減少していることが観察される。単純せん断では明確なすべり面が発生せず、全体としての変形であるため一定方向への配向が生じないことを示すものである。

ところで自然粘性土の構造観察において、粘土粒子が均一に分散し1つのマトリックスを形成しているものとして、必ずしも常に代表させうるとは限らない。自然粘性土中には、粒径が50 μm 以上に及ぶ風化の進んだ石英、長石、雲母などの1次造岩鉱物をはじめとして、ケイソウ土、有孔虫、パイライトの集合体などがいたる所にみられ、自然粘性土の連続体マトリックスに不連続性を与えている。この例を写真3.28～3.38に示した。これら特殊物質は力学的作用を受けた自然粘性土の変形挙動、特に微視的構造特性におけるベッドの変形に少なからぬ影響を及ぼすことが予想される。しかしながらこれらの物質が観察視野の中でもローカルの場所に散在するもので占有体積的には微小であるため以後の定量的表現には一応無視して考察を行っている。

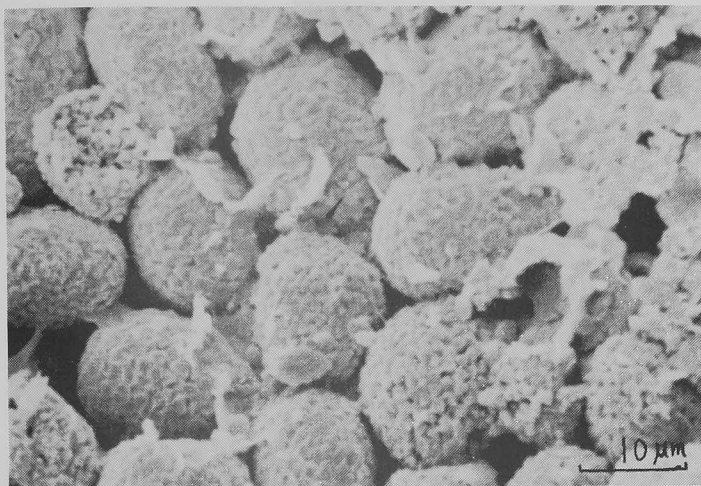


写真 3.22

ボール状物質の配列，
圧密H-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 1400$

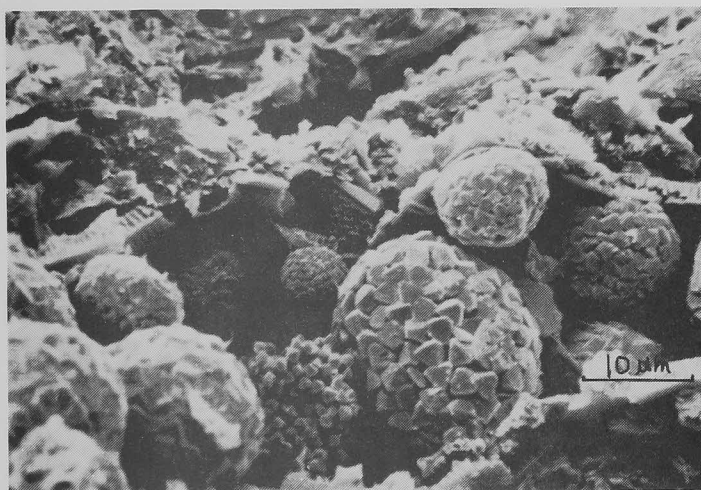


写真 3.23

ボール状物質の配列，
圧密V-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 1400$

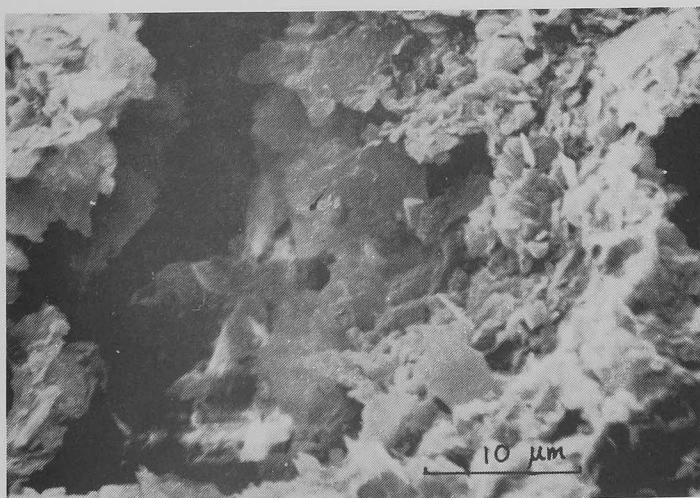


写真 3.24

大阪南港粘土の単純せん
断，V-断面
 $\sigma_N=0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$

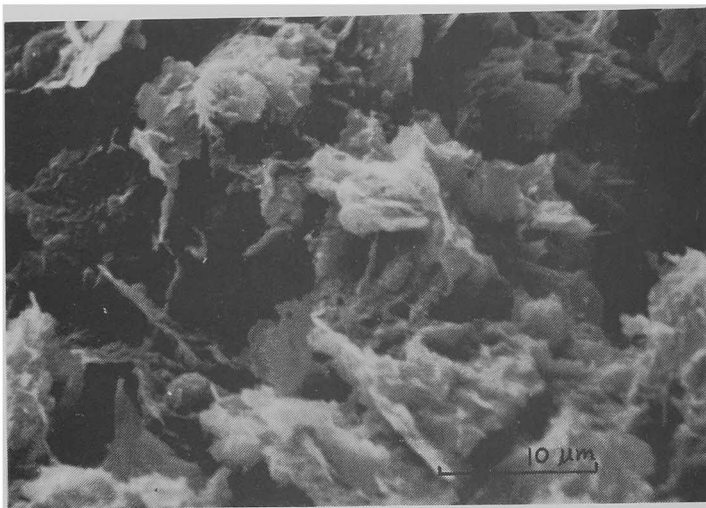


写真 3.25
大阪南港粘土の単純せん
断，V－断面
 $\sigma_N = 0.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$



写真 3.26
大阪南港粘土の単純せん
断，V－断面
 $\sigma_N = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$

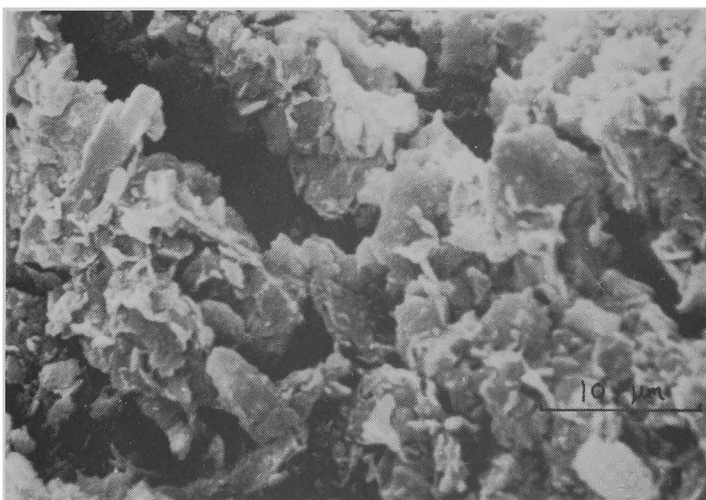


写真 3.27
大阪南港粘土の単純せん
断，V－断面
 $\sigma_N = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$



写真 3.28
立方体物質(石英) × 2000

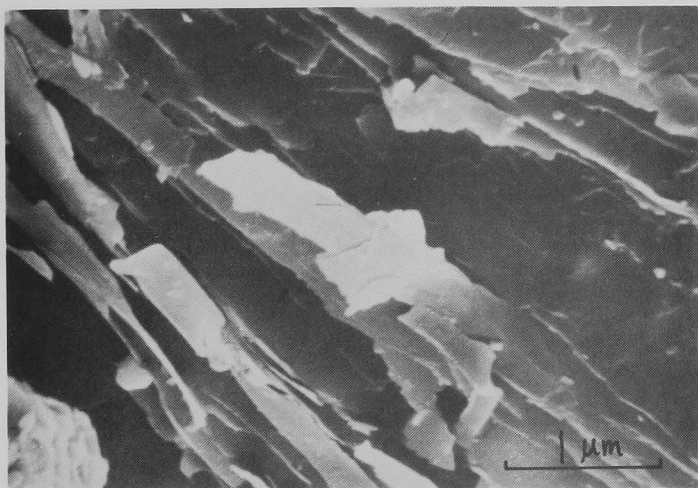


写真 3.29
風化単一粒子(石英)
× 20000

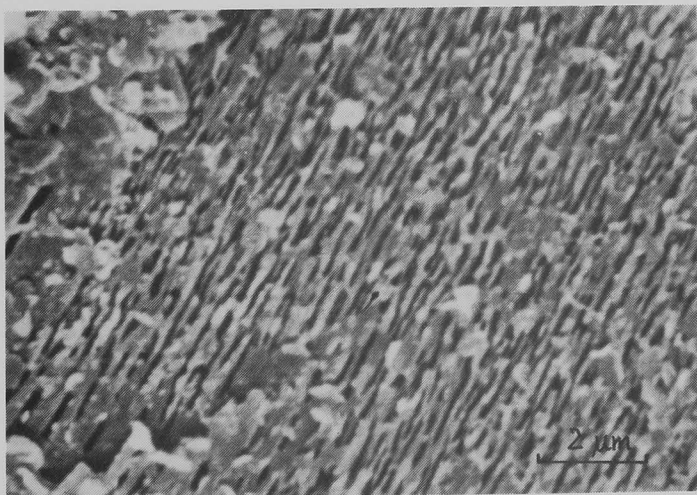


写真 3.30
風化単一粒子(長石)
× 7000

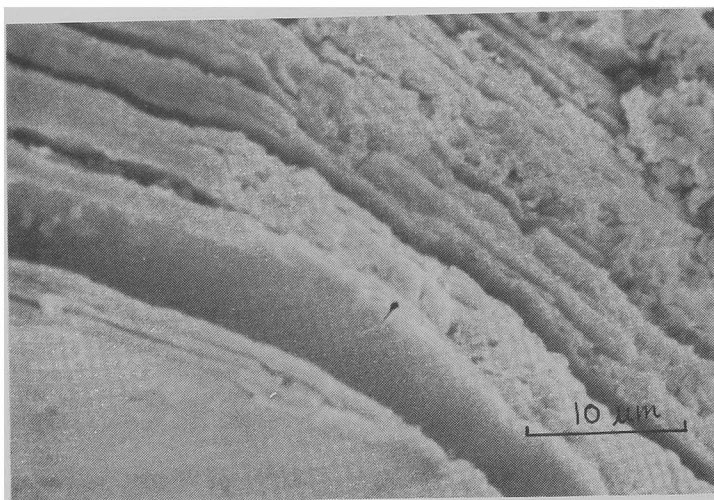


写真 3.31
雲母 ×2000

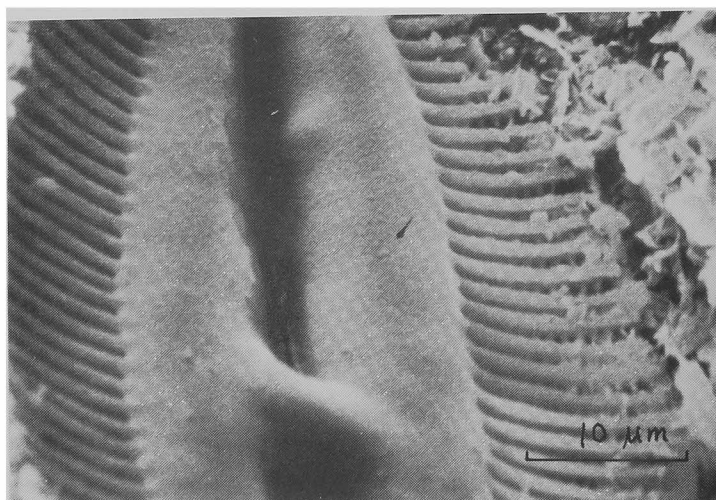


写真 3.32
ケイソウ土 ×2000

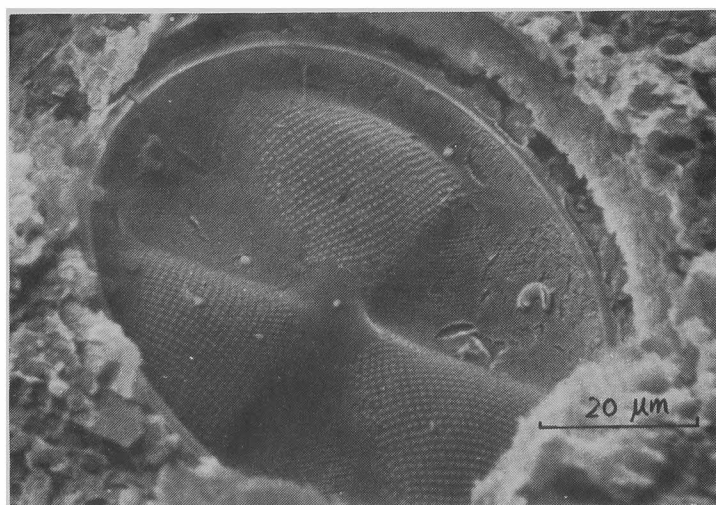


写真 3.33
ケイソウ土 ×1000

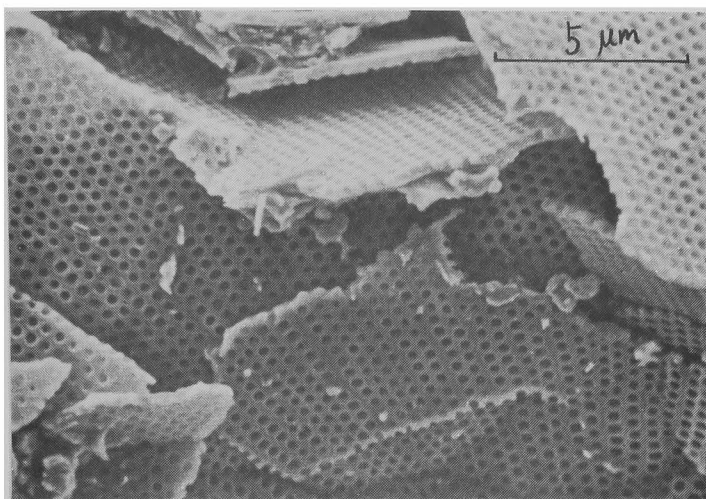


写真 3.34
ケイソウ土 ×5000

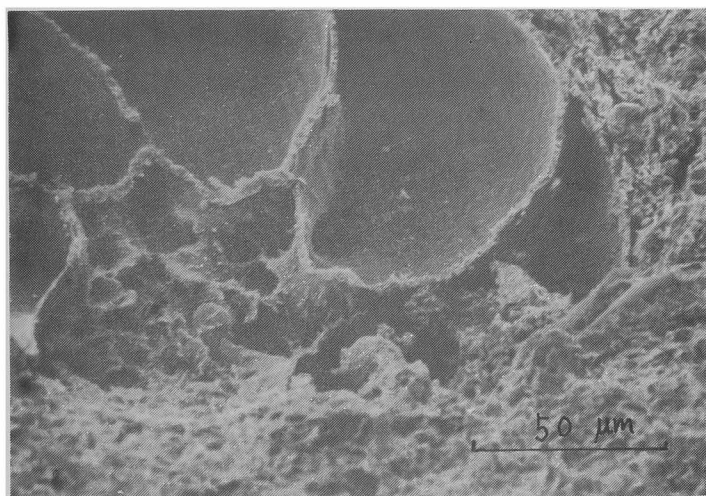


写真 3.35
有孔虫 ×500

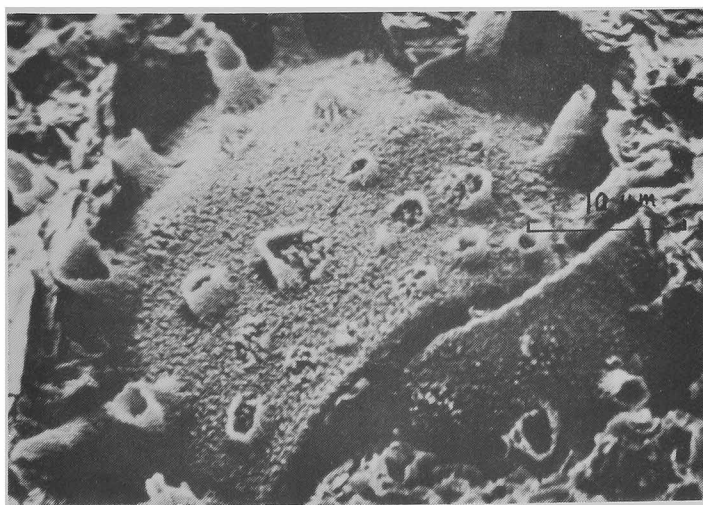


写真 3.36
放散虫 ×2000

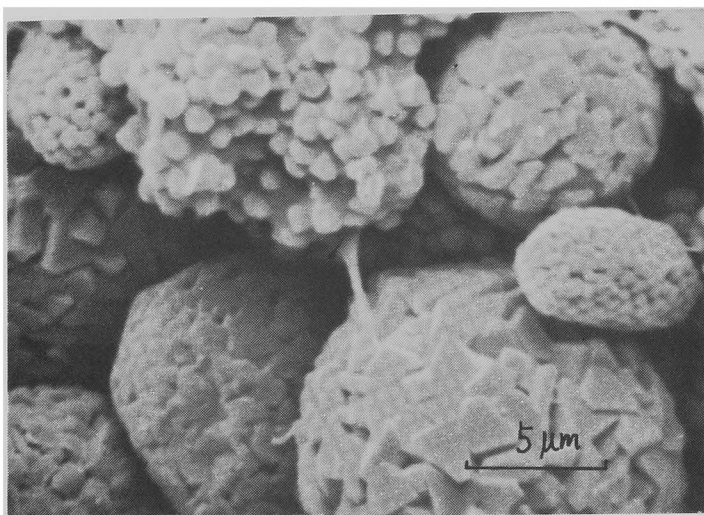


写真 3.37
パイライト ×3500

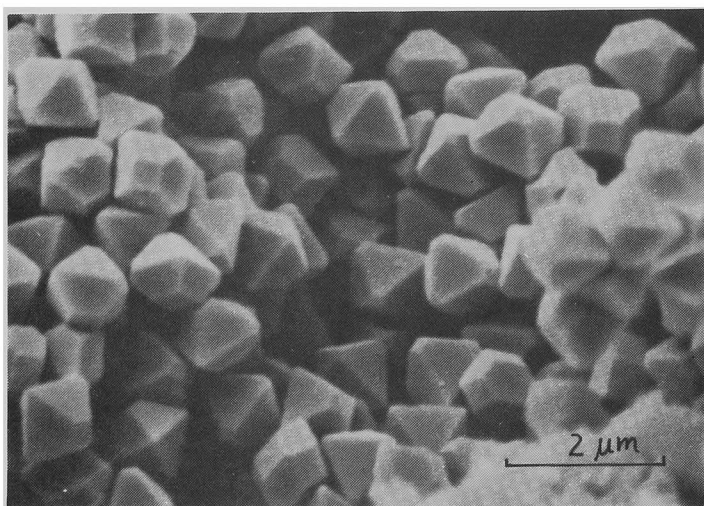


写真 3.38
パイライト ×10000

3.5 工学的性質との関連性

3.5.1 定量的表示法

微視的構造に関する研究を巨視的な力学挙動へと展開するためには、その構造の定量的な評価方法の確立が必要とされる。研究者によって異なる種々の方法が用いられ、適当な表示法はみあたらない。これまでに用いられている定量的表現の手法を整理すると以下のようなものである。

- (1) Kozeny-Carman の式を用いる方法 (Lambe, 1958⁹⁾など)

締固め土に対して、巨視的パラメーターである透水係数に着目し構造項 $K_0 S^2$ で整理する。

すなわち、次式に基づいている。

$$k = \frac{1}{K_0 S^2} \frac{e^3}{1+e}$$

$$= \frac{C_s \gamma_w}{\eta T S^2} \frac{e^3}{1+e}$$

ここに、

k : 透水係数

e : 間げき比

γ_w : 水の単位体積重量

η : 水の粘性係数

S : 単位体積あたりの土粒子の表面積

C_s : 形状係数 (0.5 : 球状, 0.33 : 棒状, 0.4 : 標準)

T : 流れの屈曲線 (有効流路長/試料長)

この式の基本条件は土粒子が均等粒径であること、流れが層流であってダルシー則が成立すること、粒子間に作用力がないこと等である。これら条件から明らかなように、この式は飽和浸透における毛管屈曲度の概念を導入した巧みな表現である。しかしながら、透水係数の測定はオーダーのばらつきを伴うものであるし、粘性土の物理化学的特性、特に間げきイオンの種類と量とに強く影響されるなど、一応の目安とはなるものの、値そのものにはそれほどの意味をもたない (Olsen, 1962³⁷⁾)。

(2) 光学顕微鏡を用いる方法 (Wu, 1960³⁸⁾, Morgenstern と Tchalenko, 1967³⁹⁾ など)

偏光顕微鏡を用い自然粘性土のすべり面を観察して、ニコルプリズムを用いた偏光比 β ,

$$\beta = I_{\min} / I_{\max}$$

I_{\min} : 最小透過光強度

I_{\max} : 最大透過光強度

を定義し半定量的に求めたものである。完全配向で $\beta = 0$, ランダム配列で $\beta = 1$ となるが、透過光強度は結晶の光学軸のずれ、鉱物の反射指数の差、断面の厚さ等に依存し、誤差も大きいため今日ではほとんど使用されていない。

(3) 相対的粒子接触の方法 (Lafeber, 1966³⁰⁾)

光学顕微鏡写真を分析し、粒子と間げきの出現の程度から、これらの成分パターンの空間分布をグラフィック表示したものである。構造の経時的な変化を定量的に比較するには全く無力であり、(2)と同様ほとんど用いられていない。

- (4) X線回折による方法 (Meade, 1961⁴⁰⁾, Martin, 1966⁴¹⁾, Quigley と Thompson, 1966⁴²⁾, Yoshinaka と Kazama, 1973⁴³⁾ など)

結晶性の大きい板状粘土鉱物のX線回折のピーク強度, ピーク面積, これらを用いた構造指数 (FI), 配向比 ($002/020$) などを用いて方向性ならびにその変化を表現する。特に FI は,

$$FI_h = \frac{2H_v}{(H_v + H_h)} \quad (\text{ピーク高さによる})$$

$$FI_a = \frac{2H_v W_v}{H_v W_v + H_h W_h} \quad (\text{ピーク高さと面積による})$$

のように図3-20を用いて表わされている。⁴³⁾ β と同様に完全配向で $FI = 0$, ランダム配列で $FI = 1$ となる。この方法は供試体の整形や研磨方法の差によって測定値に変動が大きく, 結晶性の悪い粘土鉱物や, 多種類の粘土鉱物からなる自然粘性土などでは適用がほとんど不可能である。

- (5) 極点図を用いる方法 (Lafeber, 1964⁴⁴⁾, Borodkina と Osipov, 1973⁴⁵⁾ など)

板状粘土粒子の配列状態を粒子底面方向としてその極点

で代表させ, それをステレオ投影したものである。配列状態の表現としてはわかりやすい方法であるが, 定量的表示とはなりがたく, 図表の作成と判読に熟練を要するという欠点をもっている。

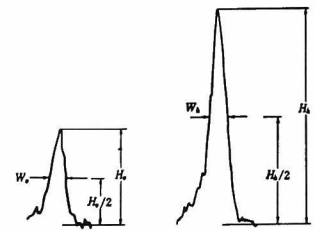
- (6) 電子顕微鏡を用いる方法 (Foster, 1973⁴⁶⁾, Tovey, 1973⁴⁷⁾, Matsuo と Kamon, 1973³⁶⁾, McConnachie, 1974³¹⁾ など)

(i) 粒子配列の配向度を表わすパラメータ (projection, area, count, length, breadth, pore size など) を測り, これによって微視的構造を記述する。

(ii) ステレオ写真から光透過法 (Optical Transform Method) を用いて粒子の空間座標を測定し, 配列状態を知る方法。

(iii) ペッド粒子の傾斜角頻度図から, ベクトル和, ベクトル方向を測定し, 力学的特性との関係で構造を示す方法。

以上6種の方法は, あくまで微視的な観点から土粒子の配列あるいは間げきの出現の仕方などに着目し, 結果として地盤の構造の定量的表現 (代表値) を試みたものである。それぞれ長所短所をもっているが, 比較的短所が少なく, かつ土そのものの姿を忠実に示している電子顕微鏡を用いた方法を中心に次項以下において詳述し, 土構造の定量的表示を通じて工学的性質との関連性を明らかにするものである。なお, 解析されるサンプルが「微視的オーダー」であるがゆえに取り扱いに慎重さが要求され, 主観的判断や個人誤差の混入を避けた客観的表現が必要である。そ



(a) V-section (b) H-section

図3-20 X線回折図の読みとり

のため、ここでは電子顕微鏡による観察を測定数の増加と測定位置のランダム化に極力留意して実施したものである。

3.5.2 M 値による構造表現

ベクトル表示としての M 値（ベクトル和）によって粘性土の構造を表現するものである。これまで砂粒子の一部に用いられている Curray(1956)⁴⁸⁾ の方法に基づいている。

まずはじめに力学的な作用で土構造に変化を与えた供試体について走査型電子顕微鏡で V - 断面を任意に観察し、えられた写真から粒子傾斜角 θ_i を測定する。すなわち最大主応力方向を N - S 軸として、 θ_i については各単一粒子、

特にシルト径の粒子の長軸、または板状粒子の端部線の N - S 軸に対する傾き角をもってする。図3-21のとおりである。5度の間隔での傾斜角の出現頻度を視野の全粒子数の比で表わすと図3-22のようになる。これらの図は圧密時の挙動を示しているが、圧密の初期にはほとんど定配向を示していないのに対して、圧密の進行と共に最大主応力面に平行な粒子長軸および端部線の配向が顕著にみられる。ここで傾斜角

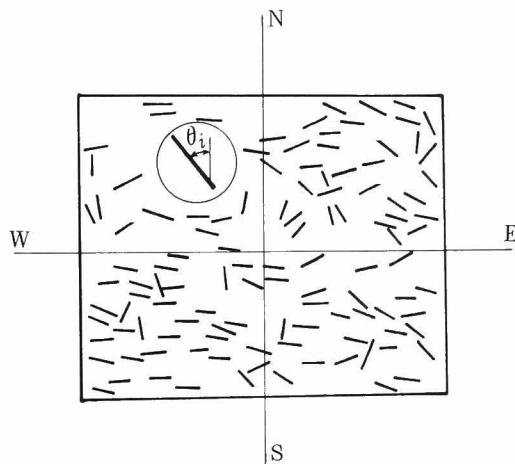


図3-21 粒子傾斜角 θ_i の読みとり

分布の測定に V - 断面における頻度分布のみをとる理由は、粘土粒子は板状およびペッド状を呈するものが多く H - 断面では粒子端部の配列方向の優先性がおこりえないためである。これは図3-22の g), h) に例示しているが、明らかに H - 断面での粒子端部の出現は観察面に対して全方向的に近いといえる。図3-22の a), b) は繰り返し後静置した試料であり、c), d) は 25.6 kg/cm^2 まで圧密したものである。両者の差が圧密作用による構造変化であるが、この差を定量的に示すものとしてベクトル表示（ベクトル方向、 $\bar{\theta}$ 、ベクトル和、 M ）を用いることができる。 $\bar{\theta}$ と M 値はつぎの式で計算される。

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sum n_i \sin 2\bar{\theta}_i}{\sum n_i \cos 2\bar{\theta}_i}$$

$$M = \frac{100}{\sum n_i} \sqrt{(\sum n_i \sin 2\bar{\theta}_i)^2 + (\sum n_i \cos 2\bar{\theta}_i)^2}$$

n_i : 頻度図の 5 度の間隔ごとに含まれる粒子数

$\bar{\theta}_i$: それぞれの間隔における平均方向で $-90^\circ \sim +90^\circ$ まで変化する

M 値は 0 ~ 100 % まであり、ランダム配列のときは粒子方向がおのの消しあって 0 % となり、完全配向のときは 100 % となる。 $\bar{\theta}$ 値は鉛直方向に対する全粒子端部の優先傾斜角を示すものがあるが、土構造における配向の程度を表現するものではない。そこで以下の考察では M 値のみを用いて行っている。

なお、一般の自然粘性土のようにシルト径を含むような場合には、それら粗大粒子の影響を無

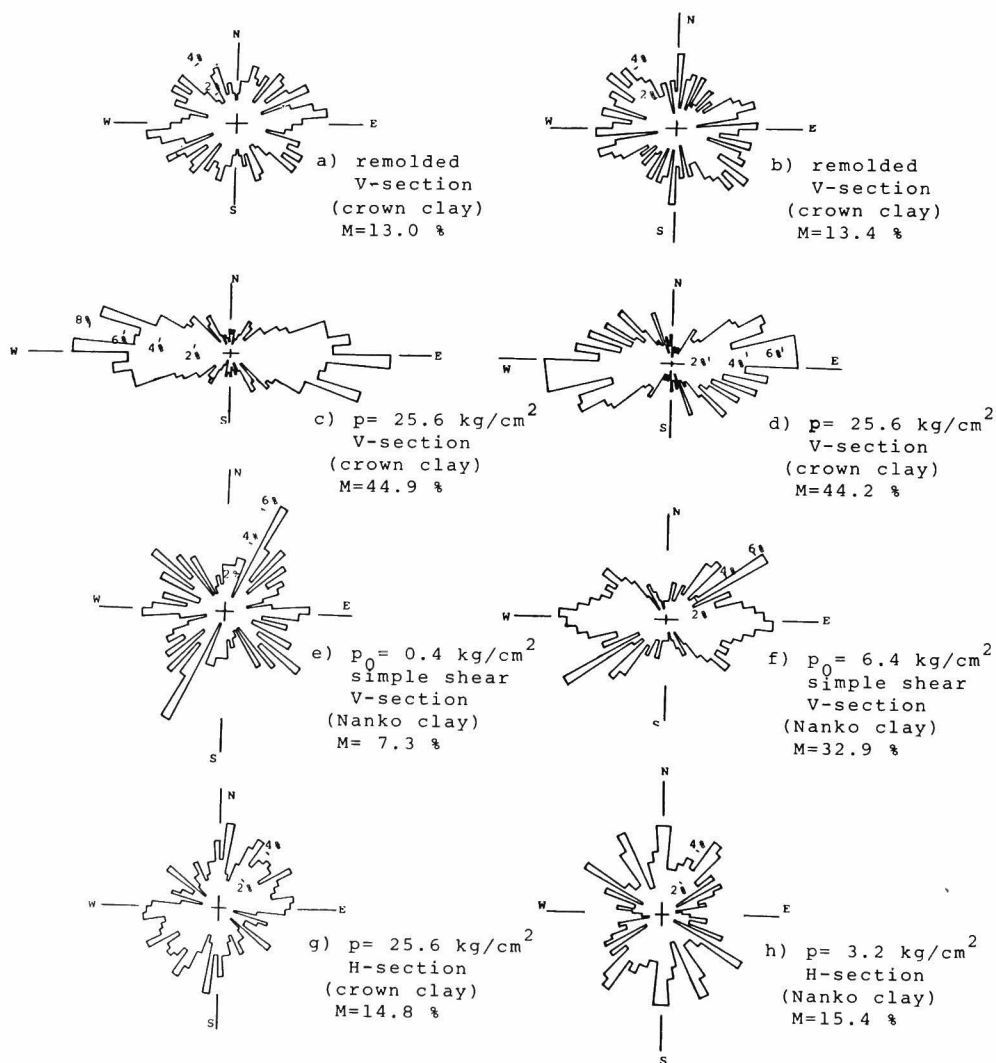


図 3 - 22 粒子傾斜角頻度図

視しえないため表3-3のような重み係数を付与している。

いま識別しうる粒子径の下限を $0.1 \sim 0.5 \mu m$ として、カオリナイトの場合の各粒子径が約 $1 \mu m$ 程度以下であることから、単一粘土鉱物の場合における大きさを1と仮定している。また前述したベッド粒子については、判別しうるすべての粒子を読みとっているから、ベ

表3-3 重み係数

Particle size	Weighting
$1 \sim 4 \mu m$	$\times 1$
$5 \sim 8 \mu m$	$\times 2$
$9 \sim 12 \mu m$	$\times 3$
$13 \sim 16 \mu m$	$\times 4$

ッドを構成している粒子1つ1つの配列の変化を表現しているものである。

さて、圧密・せん断時の土構造の変化を M 値を用いて表わしたものが図3-23である。圧密時についてはクラウンクレーと南港粘土の M 値の平均、単純せん断時については南港粘土のみの M 値を示している。圧密時では M 値の分散が図でみ

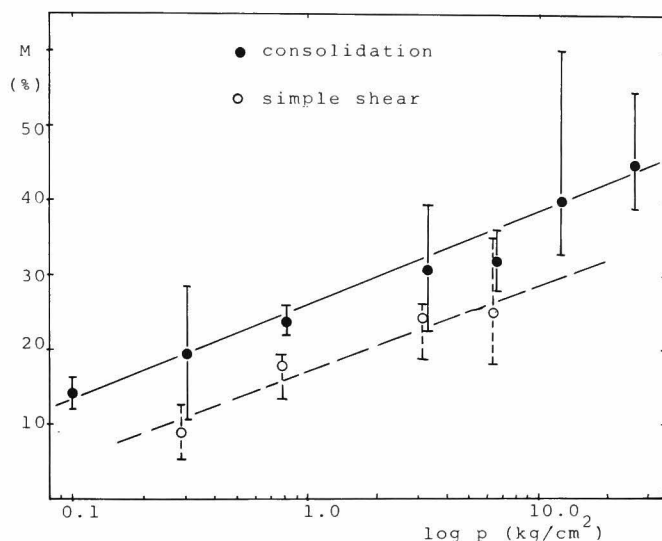


図3-23 $M \sim \log p$ 関係

るように相当大きくなっている。しかしながら用いた2種類の土試料に対する M 値はこの分散の中に含まれてしまっており、土の種類(2種とも粘性土であるが)や間げき比の差にもかかわらず、一つの範囲に統合される傾向を示している。最小目乘法によってえられた $M \sim \log p$ 関係は

$$M = 0.13 \log p + 0.26 \quad (\text{ただし, } 0 \leq M \leq 1 \text{ とする})$$

のように表わされる。これから、 $M = 0$ (0%), $M = 1$ (100%) のときの載荷重 p はそれぞれ約 10^{-2} , 10^5 kg/cm^2 となり、通常の $1 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ 程度までの荷重範囲では粒子の完全配向がおこりえないことを示しており、ベッドを形成して挙動するものである。

せん断時については破壊時の M 値をせん断前の圧密荷重 p_0 に対してプロットしている。せん断によって M 値の低下をきたしている。供試体をせん断破壊するとすべり面に沿った粒子の配向がみられるとされているが、これはすべり面のごく近傍のみであり、供試体全体の配向性は減少することを示している。せん断変形によって粒子端部の回転が生じることに起因するものと考えられる。なお、測定に用いた供試体の等体積単純せん断試験の結果は図3-24のとおりである。図中の矢印はストレスパスを表わしており、破線は限界状態(せん断破壊時の限界間げき比線)を

示すものである。
 さらにせん断時の
 のストレスパス
 を M 値で表わし
 たものが図3-
 25である。これ
 は粘性土の正規
 状態から破壊に
 いたる1つの状
 態面を示すもの
 とみなしうる。
 図中の S -線は
 上述したように
 ある範囲をもつ
 ものであるから、
 この状態面には
 厚さが存在する
 ものである。

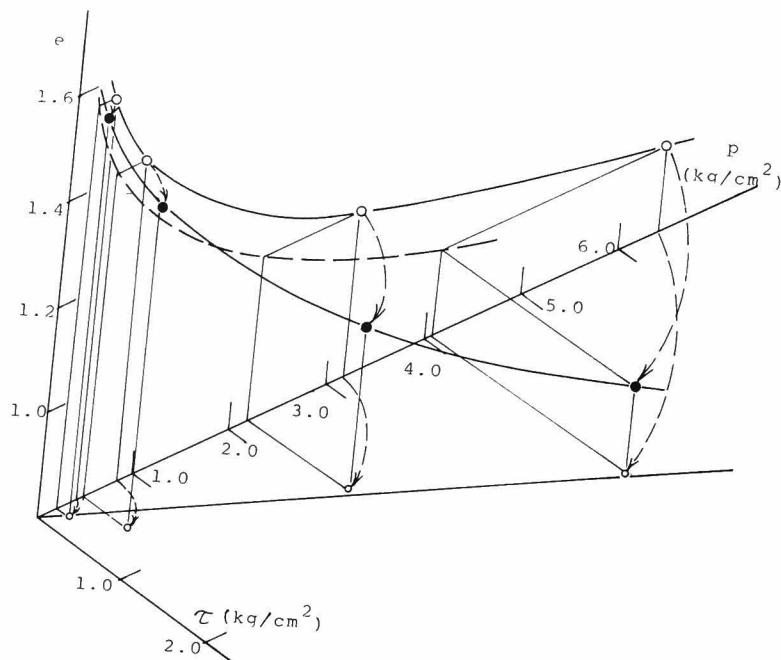


図3-24 $\tau \sim e \sim p$ 関係

さらに過圧密
 状態における M
 値の変化につい
 て示したものが
 図3-26であり、
 $e \sim \log p$ 関係
 とあわせて表示
 している。除荷
 に伴う膨潤によ
 って間げき比が
 増加するほどに
 は、過圧密試料

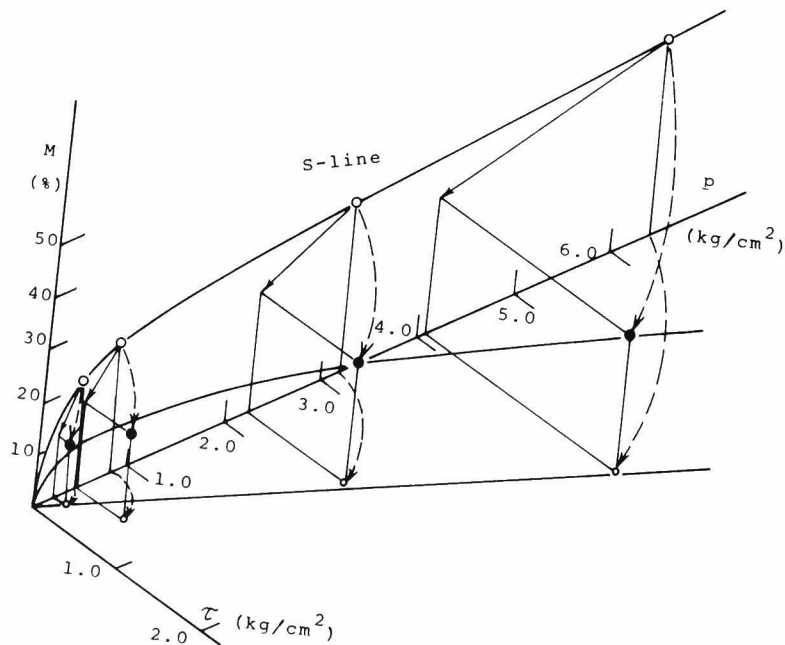


図3-25 $\tau \sim M \sim p$ 関係

の M 値の減少がみられない。除荷の弾性変形では粒子配列が変化しないことの傍証とも考えられ
 る。さきに述べたように M 値はある範囲にばらつくものであるが、図の $M \sim \log p$ 曲線は巨視的

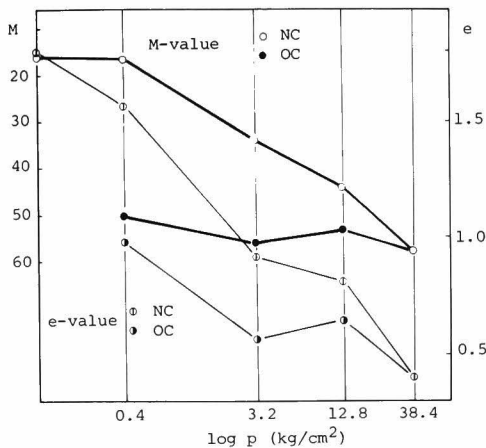


図3-26 $M, e \sim \log p$ 関係

圧密挙動を予想以上に表現しているようであり、構造表現の状態量としての M 値の有効性が認められる。

3.5.3 ベッドによる構造表現⁴⁹⁾

3.2で述べたように構造パターンは粘土鉱物の単一粒子として挙動するのではなく、ベッドの形状をとっている。そのためこのベッドの出現状況ならびに変形挙動を把握することが肝要である。

ベッドの観察は M 値と同様に V -断面、

すなわち試料の堆積断面とする。1つの検鏡供試体（サイズは約8mm平方）から写真撮影面を図3-27のようにX-Y方向ともに5～6枚の写真を無作為にとり、1つの力学的条件に対して約10個の検鏡供試体をとっている。電子顕微鏡の観察倍率は×500に統一して解析したが、これは主として1～50 μm の大きさのベッド粒子を観察することになり、粘土分とシルト分の相関にもとづくベッドに着目していて、砂分については考慮の範囲外である。

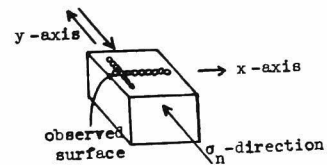


図3-27 電子顕微鏡観察面

得られたベッドの観察写真は写真3.39～3.43のようである。ベッドの形状は自然堆積時の角ばった形から、圧密の進行と共に角がとれて滑らかな球形へと変化している。

ベッドの粒径の識別にはつぎの方法を用いている。電子顕微鏡写真からベッドの形状を、例えば写真3.39から図3-28のようにトレースして、各ベッドの径を図3-29のようにH-方向、V-方向について測定する。このような定方向径はGreen径とも呼ばれるが、電子顕微鏡写真から粒度分布を算定するときによく用いられている方法であり、写真でもわかるようにベッドの形状が不均一で長軸・短軸の識別が困難な場合最も適当な手法である。

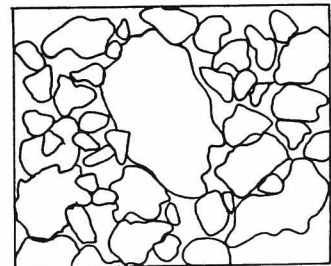


図3-28 ベッドのトレースの例

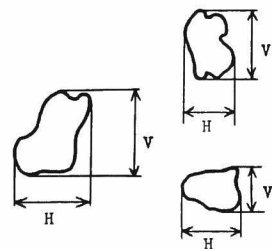


図3-29 定方向径

(1) ベッドの頻度分布

測定されたベッドの粒径は0.2 μm から最大150 μm までである。これらの頻度分布（H-方向径、V-方向径）

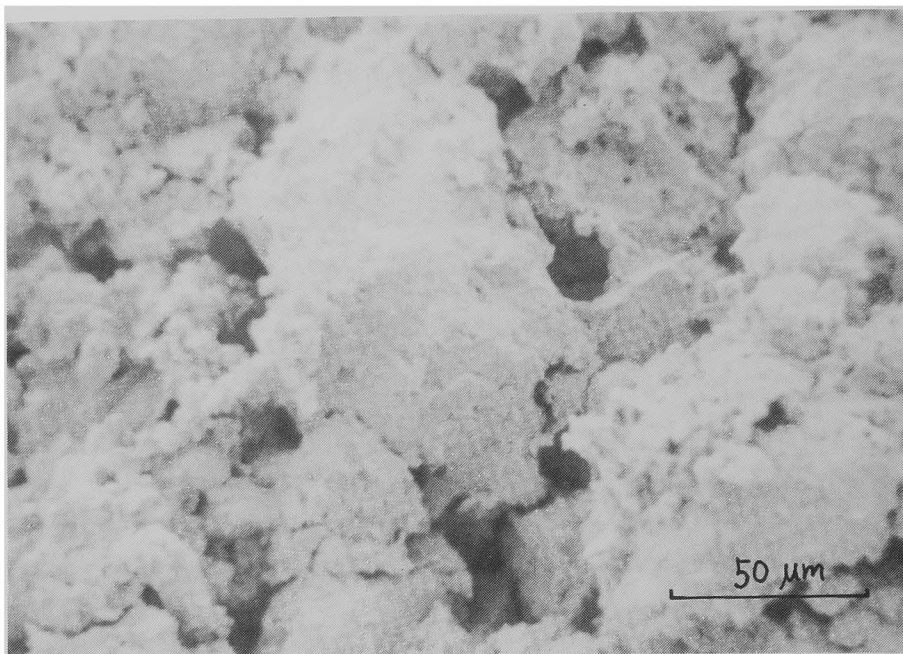


写真3.39 ベッドの観察
自然沈降堆積時，V-断面 × 500

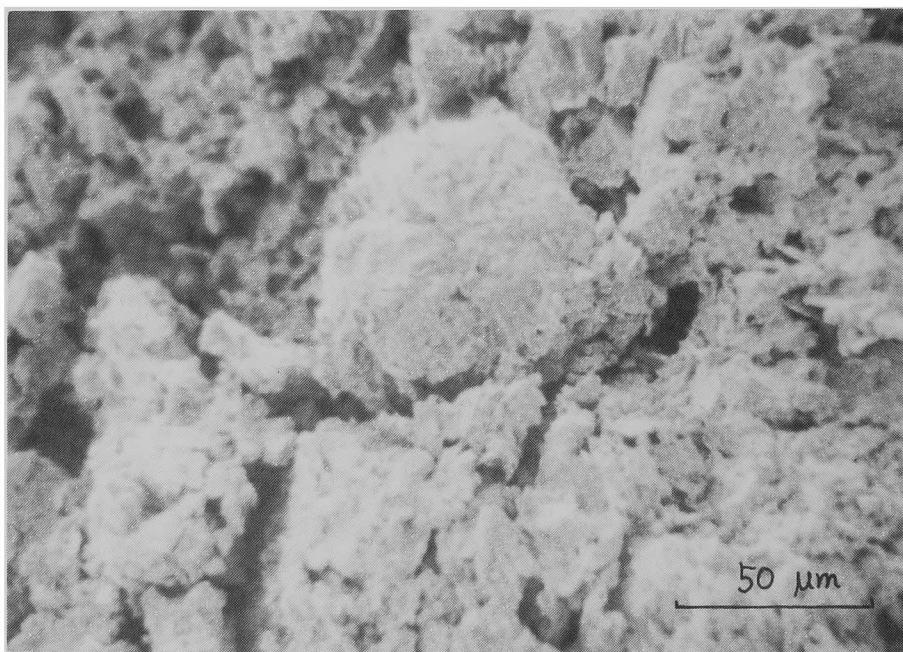


写真3.40 ベッドの観察
圧密V-断面， $p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ × 500

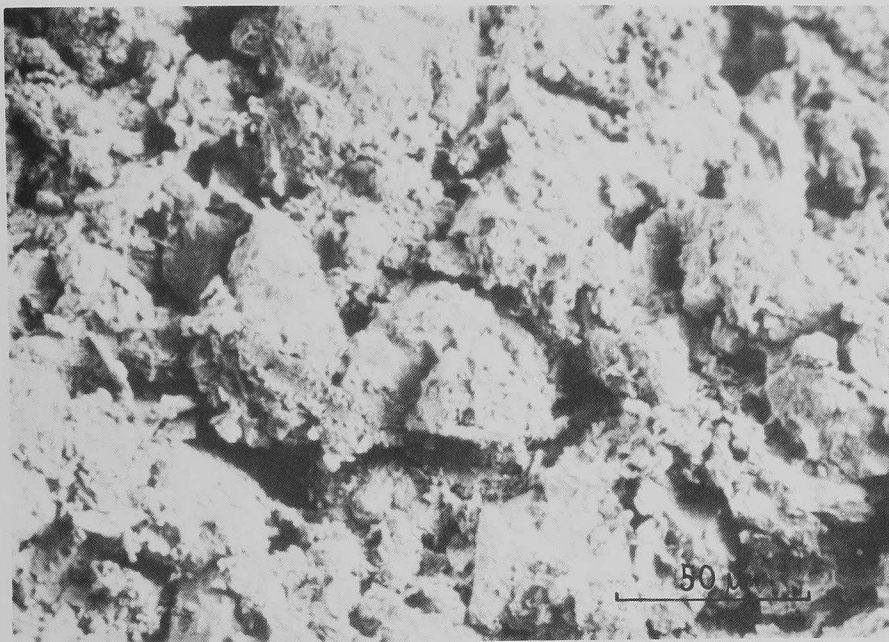


写真 3.41 ベッドの観察
圧密 V - 断面, $p = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ $\times 500$



写真 3.42 ベッドの観察
圧密 V - 断面, $p = 4.0 \text{ kg/cm}^2$ $\times 500$

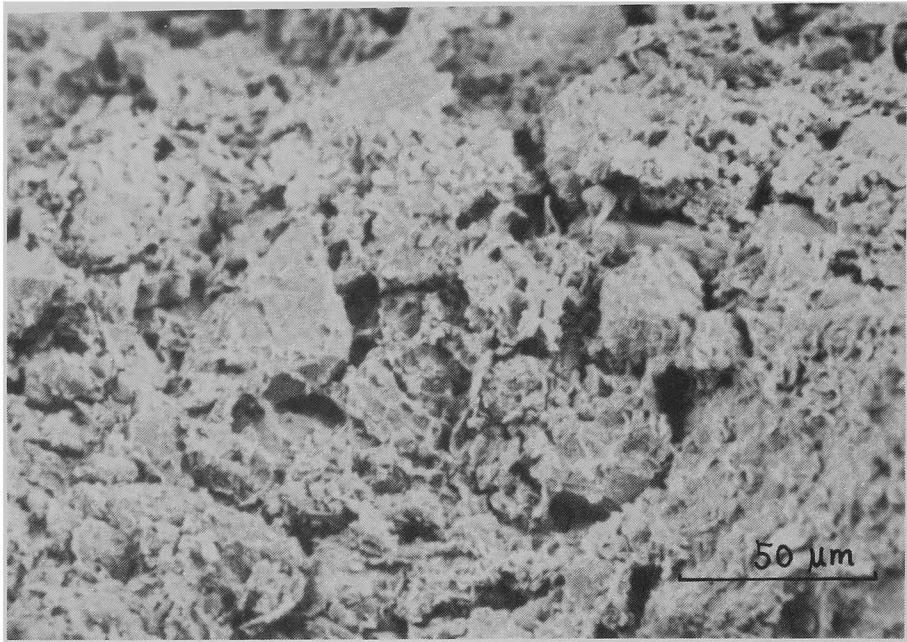


写真 3.43 ペッドの観察
圧密 V-断面, $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2$ $\times 500$

を示すと図 3-30, 3-31 のようになる。曲線形は電子顕微鏡による粒径測定に特有の左の方への偏りを示し正規分布をなしていない。グラフから D_{50} (これ以下の粒径のペッドの数と、これ以上の粒径のペッドの数が等しい粒径) と D_{mod} (全ペッドの平均粒径) とを読み取ると、それらは約 $4 \mu\text{m}$ の偏りを持ち D_{50} が曲線のピークの右方へのずれを示している。この状況は圧密荷重の増加によっても同様な傾向を有しているが、曲線の形状が尖ってくる、すなわち偏差が少なくなる傾向をもっている。なお D_{50} は $10 \mu\text{m}$ から $19 \mu\text{m}$ 程度であり、これはさきに定義したペッドの粒径からすればメゾペッドの

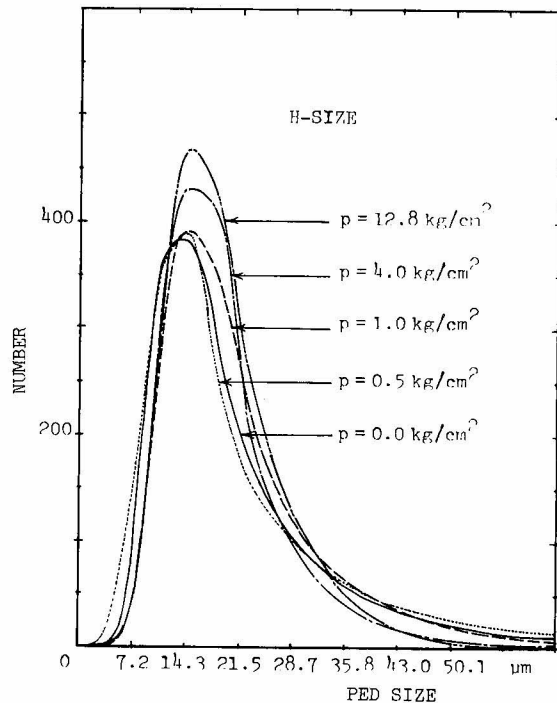


図 3-30 ペッド H-方向径の頻度図

領域である。

以上に示したベッドの分布に対して、同じ試料を完全分散処理を行ってその分布を求めたものが図3-32である。粒径は同様の手法で測定されているが、図中の黒丸の自然堆積時の状況と比較して、完全分散では全くその粒度分布を異にしていることを示している。粘性土の自然堆積がベッド状であることが明白である。

さらに定方向径の比 V/H を個々のベッドについてとったものが図3-33である。載荷重の増加に伴って当然のこととはいえ V/H が1から0.7へと減少している。すなわち、圧密によるベッドの偏平化を示すものである。これらの結果をまとめると表3-4、及び図3-34のようになる。

(2) ベッドの形成と変形のメカニズム

粘土コロイドのような分散系に電解質が存在すると van der Waals 力によってきわめて速やかに凝集が生じる。マイクロベッドのように小さいベッドは、通常の攪乱や練り返し程度では破壊されず、粘土スラリーの静置後、粒子間力によって急速に平衡位置に移動し、ミゾベッドやマクロベッドを形成しながら沈降堆積を行うものである。そして堆積後は外部からの力によって、単なる平衡位置か

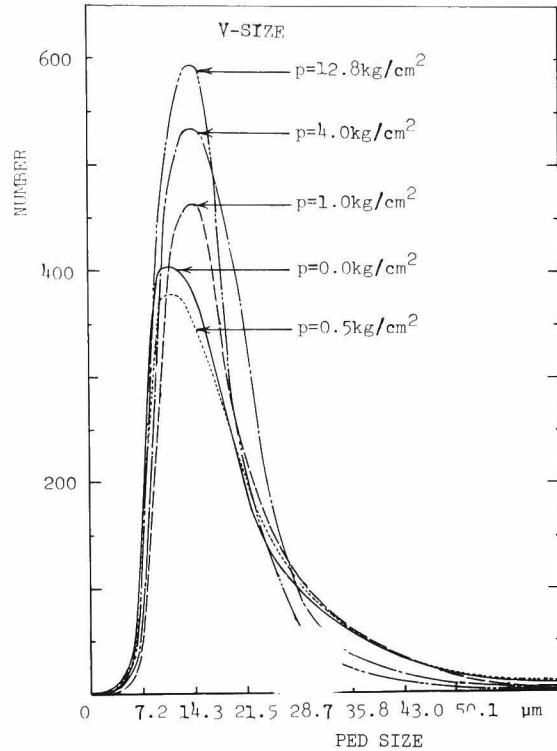


図3-31 ベッドV-方向径の頻度図

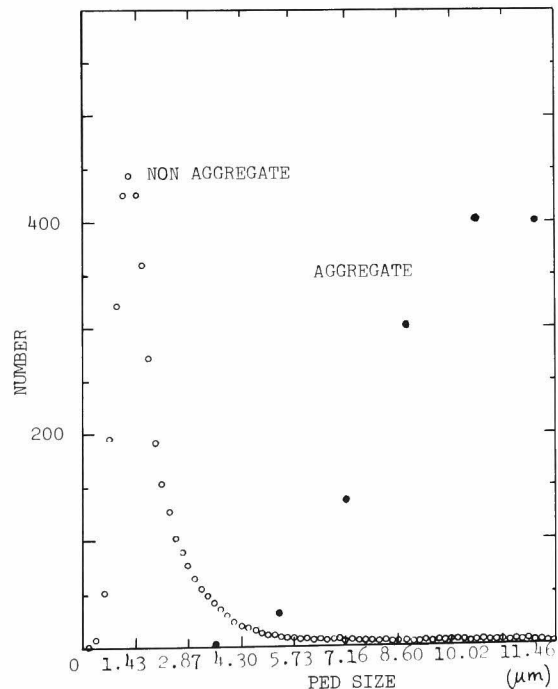


図3-32 完全分散状態の粒子径とベッド径の頻度図

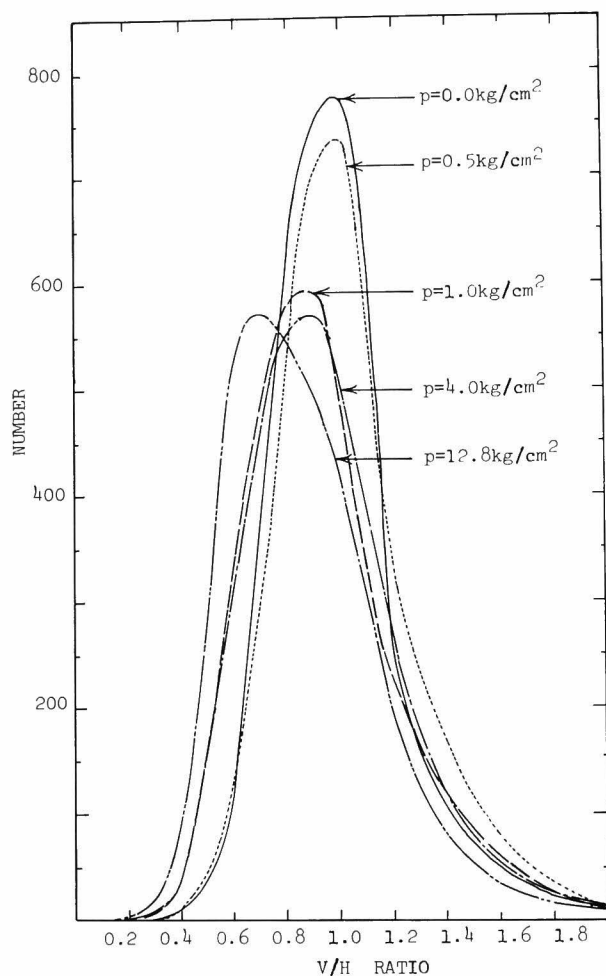


図3-33 V/Hの頻度図

ら、より安定な状態へ移行してゆく。ベッドの変形過程として図3-35のような模式的表現が可能である。これはYong ら (1975)³³⁾ によっても示されているが、1次圧密中の変形は主としてマクロポアの減少とマクロベッドの変形に対応しており、2次圧密的な時間依存挙動はベッ

ド中のメゾポア、ミクロポアの減少ならびにメゾベッド、ミクロベッドの変形に依存するものである。

さらに、さきに述べた過圧密粘土における M 値の特性からみても、除荷に伴う膨潤時のベッドの挙動は弾性的であり、粒子配列は不変とみなしうることから、膨潤はポア量の増大のみによ

表3-4 ベッド径 D_{50} の変化

	V-size	H-size	V/H
Sedimentation	17.3 μm	17.7 μm	0.97
$p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$	18.3 μm	18.3 μm	1.00
$p = 1.0 \text{ kg/cm}^2$	17.4 μm	19.2 μm	0.90
$p = 4.0 \text{ kg/cm}^2$	15.9 μm	17.6 μm	0.91
$p = 12.8 \text{ kg/cm}^2$	14.8 μm	18.0 μm	0.78

ていると考えることができる。

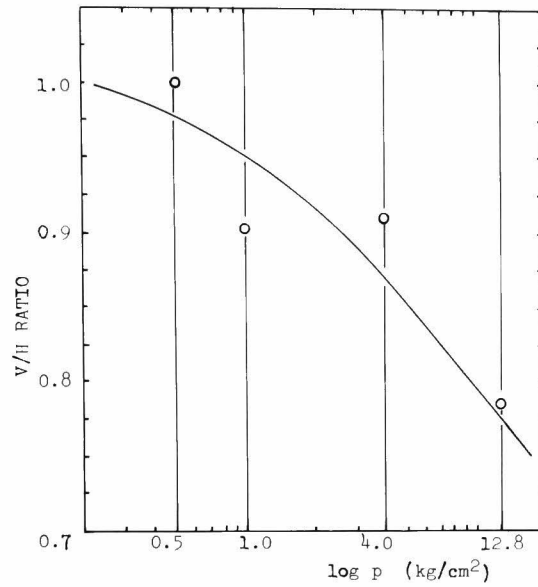
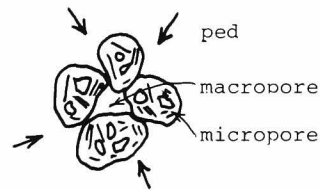
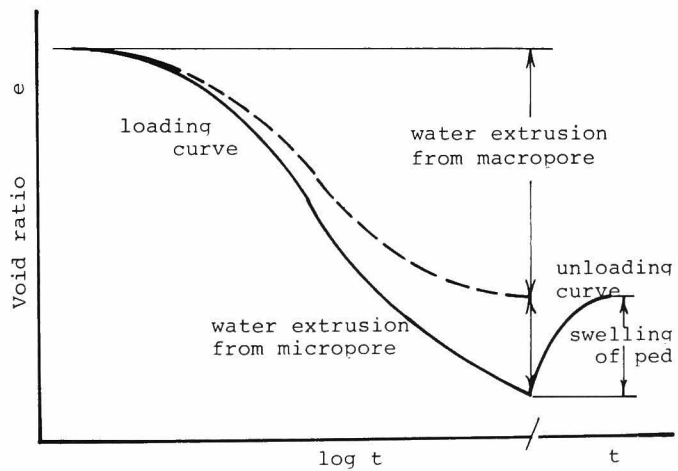


図3-34 ペッド D_{50} の V/H の変化



(a) Basic unit



(b) Meaning of macroscopic consolidation

図3-35 ペッドの変形メカニズム

3.5.4 ポアによる構造表現

前項ではベッドに着目してその出現状況と変形メカニズムについて述べたが、ここではベッドと表裏一体をなしているポアについてとりまとめている。ポアにはベッド間に存在するマクロポアと、ベッド内のメゾポア、ミクロポアに大別される。

ポアの測定には走査型電子顕微鏡の観察倍率を×500とし、ポア面積、ポア径、ポア形状等について考察するものである。

ポア分布の測定方法としては、このほかに不攪乱乾燥試料に対して水銀圧入法（ポロシメータを用いる）や気体吸着法などがある。これらは乾燥試料に圧力を加えるためにポアを破壊する危険性があること、特に前者ではインクビン効果によって微小のポアを過大評価したり、偏平なポアに対してはポア径の算定に誤差が大きくなること、また水銀混入試料の廃棄処分がむづかしいことなどの理由からこれら2つの方法は使用しないこととした。

(1) ポア面積

測定視野数、写真数を同一にしてポア面積を算定すると、総ポア面積は圧密の進行と共に減少し、また除荷による過圧密比が大になるにつれて徐々にふえていく傾向がみられた。ここでポア面積としなかったのは、写真撮影面の2次元像を取り扱っているからである。測定された各ポア面積は $2.5\mu m^2$ から最大のもので $1325\mu m^2$ までである。

さて、微視的構造を表現する1つの指標としてポア面積比 e_a をつぎのように定義する。

$$e_a = \frac{(\text{ポア総面積})}{(\text{写真視野の残りの面積})} = \frac{(\text{ポア総面積})}{(\text{ベッド総面積})}$$

e_a は間げき比 e と類似のパラメーターであるとみなすことができる。ここで上式の分母をベッド総面積としているが、ベッド中にはミクロポアが含まれるので分子が必ずしもポア総面積に該当するわけではない。しかしながら、測定倍率の範囲ではミクロポアは測定限界外となることから上記表現を行ったものである。

圧密時の間げき比 e と e_a との関係は図3-36のとおりである。 e_a は面積比であって、体積比である e とは次元の異なるものであるが、この基本的差異は別として両者の関係はほとんど線形に近い対応がみられる。次式のようになる。

$$e_a = 0.203 e$$

上式が成立する以上、当然のことであるが e_a と $\log p$ の関係は図3-37のように $e \sim \log p$ 曲線

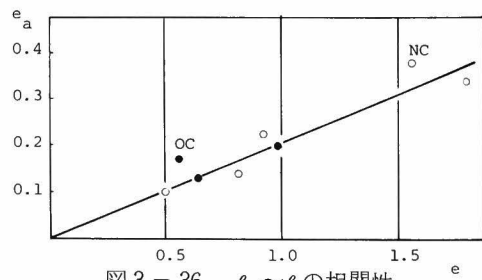


図3-36 $e_a \sim e$ の相関性

と似た形となる。過圧密試料における e_a が $e \sim \log p$ 関係に比較して過大であるが、除荷によるマクロポアの増大が顕著なためである。

また圧密試験よりえられた透水係数 k との関係は図3-38のとおりであり、 e_a およびポア総面

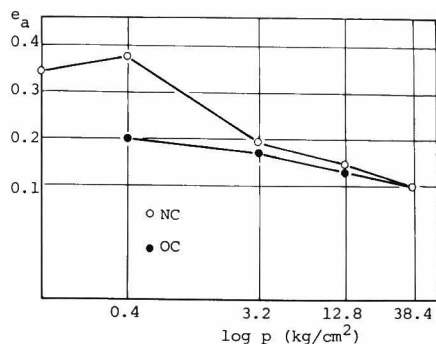


図3-37 $e_a \sim \log p$ 関係

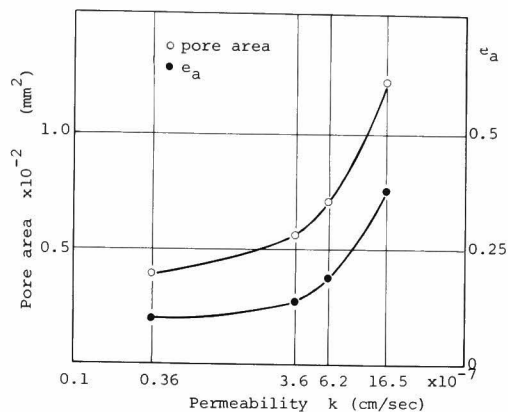


図3-38 ポア面積と透水係数の関係

積で k の変化をよく表わしている。

以上の結果から、微視的構造観察にもとづくポア面積比 e_a が力学的作用下における構造変化を表現する状態量として1つの有力なパラメーターであるとみなすことができる。

図3-39, 3-40はポア面積の出現頻度分布をとったものである。圧密の進行と共により小

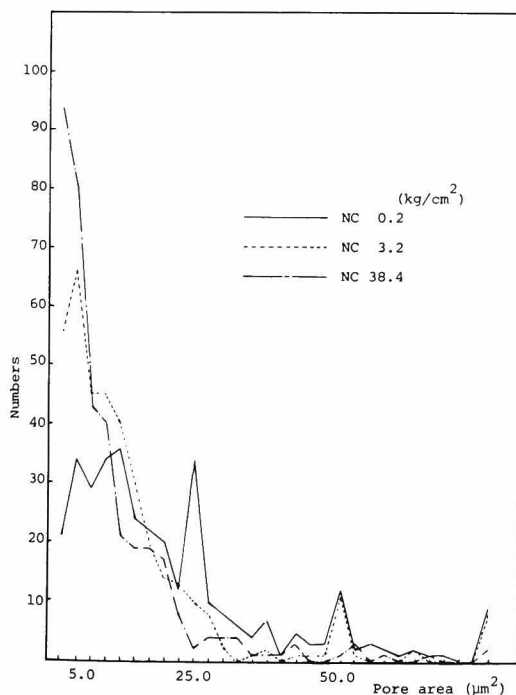


図3-39 ポア面積の頻度図 (正規圧密状態)

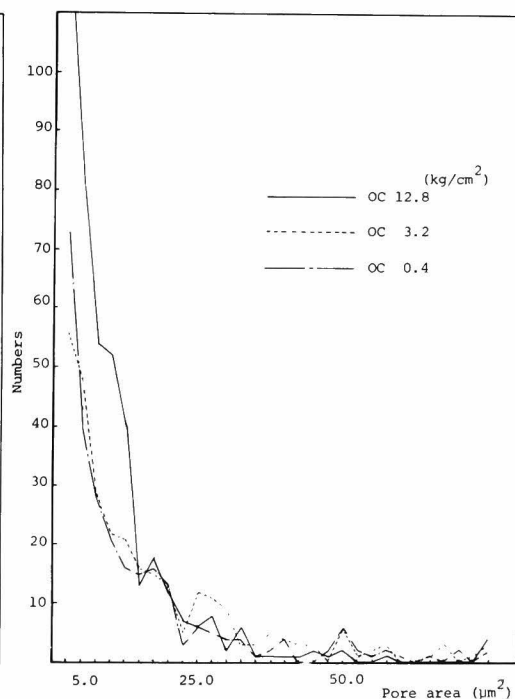


図3-40 ポア面積の頻度図 (過圧密状態)

さい面積のポアの増加が生じており、過圧密粘土の場合は過圧密比の増大に伴って非常に小さいポアの個数が減っていくのが観察される。

つぎにポア面積の平均値について検討する。図3-41に示す A_{mean} はポア面積の算術平均値であり、 A_{50} とはそれより大きいポアの個数と小さいポアの個数が相等しいポア面積である。 A_{mean} の方が A_{50} より全般に大きな値をとる。 A_{50} については無载荷の状態を除いてほとんど一定の値をとっている。それに対して A_{mean} は

圧密に伴ってほぼ直線的に減少し、除荷による過圧密比の増加によって逆に正規のラインに沿って増大している。過圧密試料において生じるクラックやヒビワレがマクロポアの増大となり、 A_{mean} の増大につながるものと考えられる。

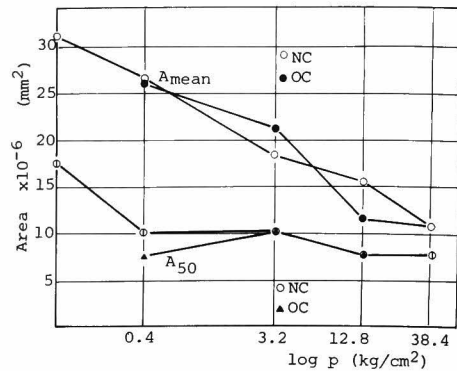


図3-41 A_{mean} と A_{50} の変化

(2) ポア径

ポアの出現状況に関し、ポア径についての検討結果はつぎのとおりである。

まず定方向径（V-方向径，H-方向径）を測定する。測定ポア径の範囲は最小 $0.5\mu m$ から最大 $40\mu m$ までである。さきの定義ではメゾポアとマクロポアの境界を $10\mu m$ としているので、測定ではメゾ，マクロポアに相当している。図3-42，3-43にV-方向径の結果，図3-44，3-45にH-方向径の結果を示した。正規圧密の場合ではV-方向径は载荷重の増大と共に頻度の山が左の方へ移るのがみられる。すなわち，間げきが圧縮されポア径が徐々に小さくなっていくことを示している。また出現頻度の山が尖ってくる傾向もみられる。一方，H-方向径では頻度の山はほとんど差がみられない。過圧密の場合の図3-43では過圧密比が増大するにつれてその頻度の山が右方へずれており，除荷による膨潤とともに間げき比が増大していく傾向をポア径でも表わしている。これはH-方向径の場合の図3-45にも同じ傾向がみられ，正規圧密のような塑性変形とは異なって，膨潤の場合は鉛直・水平方向にかかわりなくポア径が増大していくものである。

(3) ポア形状

ポアの形状はきわめて複雑な形状をとっている。マクロポアで特に著しい。メゾポアなどの比較的小さいポアになると楕円形に近くなり，ポア空間の減少によってほぼ円形になっているポアも存在する。当初は圧密に伴って最大主応力方向（圧密方向）に長いポアが少なくなって，水平方向に長いポアの増加を予想していた。そこで(2)のポア径のV/Hを算定したがほとんど傾向らしいものはみられなかった。ポアの形状は複雑な様相を呈しているものであるから，細長比とい

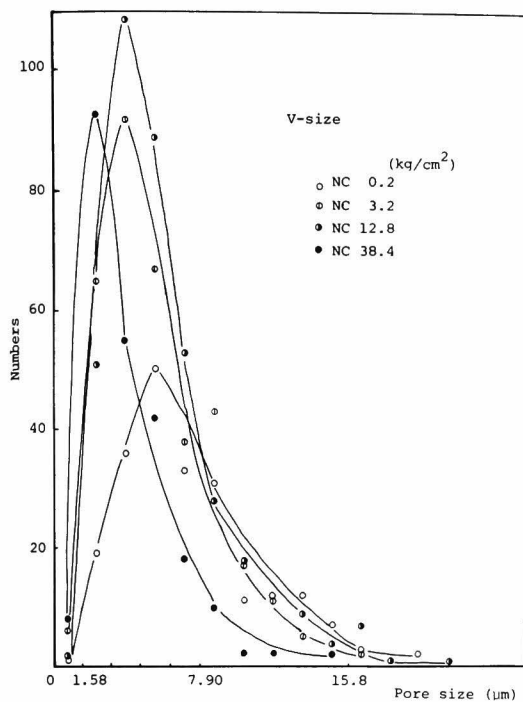


図3-42 ポアV-方向径の頻度図(正規圧密状態)

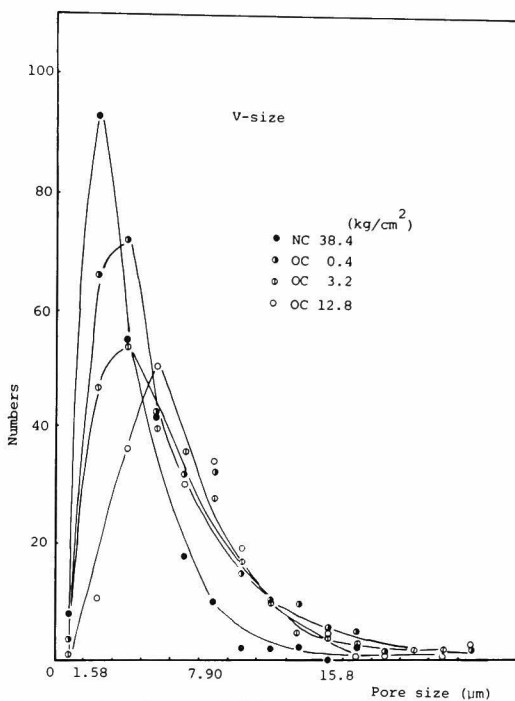


図3-43 ポアV-方向径の頻度図(過圧密状態)

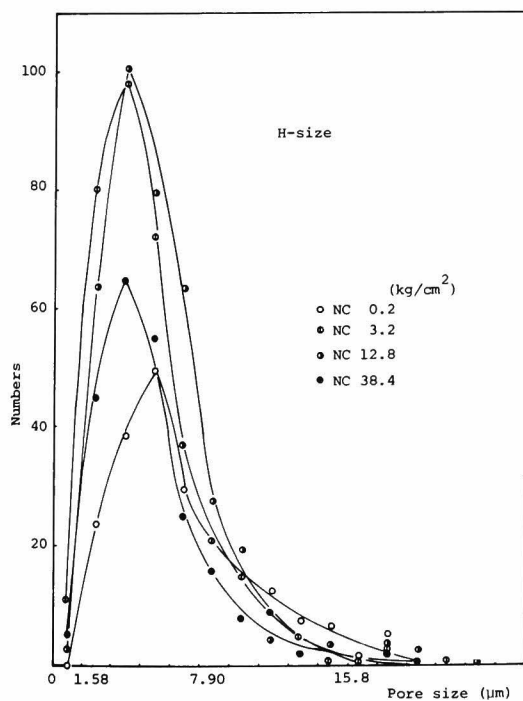


図3-44 ポアH-方向径の頻度図(正規圧密状態)

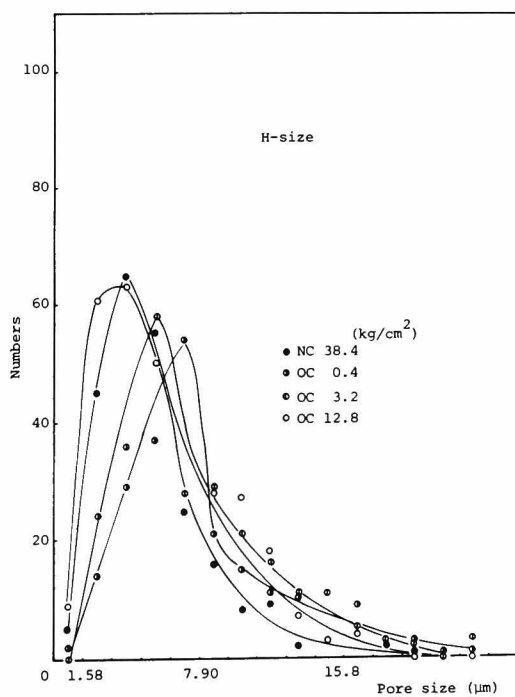


図3-45 ポアH-方向径の頻度図(過圧密状態)

ったもので整理すべきであろう。V－方向径、H－方向径にかかわらず、より長いサイズをより短いサイズで割った値を集計して算術平均をとったものが図3－46である。

すなわち、

V/H (V－方向径>H－方向径のとき)

H/V (H－方向径>V－方向径のとき)

としたものである。

多少の変動がみられるものの正規圧密・過

圧密ともに直線で近似される。圧密荷重の増大に伴ってベッド間のポアは鉛直方向であれ、水平方向であれ細長比の増大、すなわち扁平な細長い形状に変化することが示されている。

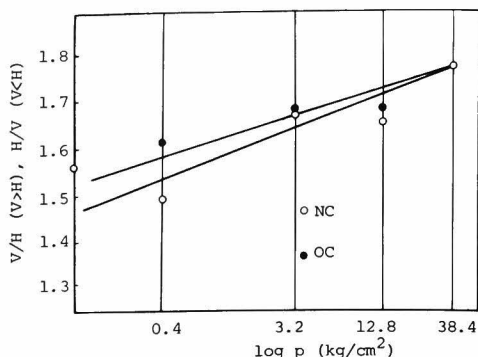


図3－46 ポア形状の変化

3.5.5 初期構造の差と工学的性質との関連

前項までは構造の変化過程が力学的な作用に伴ってどのように推移するかという点に着目して定量的な表示を行ったものである。ところで、3.2で述べたように構造モデルはその出発点において界面イオンの種類と量、有機物や凝集物質の存在など種々の要因に依存して変化するものである。そのために、初期構造をあらかじめ変化させておくと、それ以後の挙動にも差を生じる。そこで以下に述べるような方法で粘性土の構造を初期に変化させて、それらの構造の、力学的な作用下での挙動について考察する。

(1) 初期構造の変化のための試料条件と調整法

つぎの4種類の試料を準備している。

(i) 非塩分凝集試料 (No.1 試料)

水道水による洗浄 ($w = 1000\%$, 上澄み液除去3回) を遠心分離機 (10000 rpm, 20 分間) にて行い、含水比を93%まで下げた試料。低塩濃度溶液 (淡水) 中において形成される分散構造に類似のものとなる。

(ii) 中間的塩分凝集試料 (No.2 試料)

洗浄 (上澄み液除去操作1回) 後、含水比を124%まで下げた試料。中間的塩濃度溶液 (汽水) 中において形成される構造をもつ。

(iii) 塩分凝集試料 (No.3 試料)

試料の含水比を調整し単に繰り返しただけのもの。高塩濃度溶液 (海水) 中において形成される凝集構造に類似のものとなる。載荷する最終圧密荷重の相違によって表3－5のような8種の供試体を作成したが、初期含水比の圧密挙動に及ぼす影響を調べるために表のような含水比の変化

表 3-5 無処理試料の e_0, w_0

$p \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	e_0	$w_0 \text{ (\%)}$
0.1	4.21	159
0.2	4.26	161
0.4	4.06	153
0.8	3.69	139
1.6	3.47	131
3.2	3.76	142
6.4	3.36	127
12.8	3.22	122

をあらかじめ付与したものである。

(Ⅳ) 凝集剤添加試料 (No.4 試料)

試料含水比を 250 % にし、凝集剤として PAC (ポリ塩化アルミニウム) を土の実質重量 100 g に対して、PAC 中の Al イオン 0.01 モルの割合で添加した試料。

なお、以上 4 種の試料の含水比が異なるのは、コンシステンシーの違いによるためである。

圧密試料は標準圧密試験を行い、最終圧密荷重は 0.1

kg/cm^2 から 12.8 kg/cm^2 までの 8 種とした。試料はま

ず十分練り返した後、圧密リング内に流し込み、1 時間半静置後圧密を開始した。一方せん断試験は圧密非排水せん断を通常の一面せん断試験により実施した。

(2) 構造の差と圧密・せん断挙動

図 3-47 に 4 試料の最終圧密荷重 0.1 kg/cm^2 のものの沈下曲線を示している。図では各試料の構造の相違が明らかであり、凝集試料の No.4 が分散試料の No.1 に比べて透水係数が大きく、圧密が速く終了していることが判る。これは No.4 試料の方がベッド径が大きくマクロポアが多いためであることが容易に推測される。さらに各試料の圧密沈下

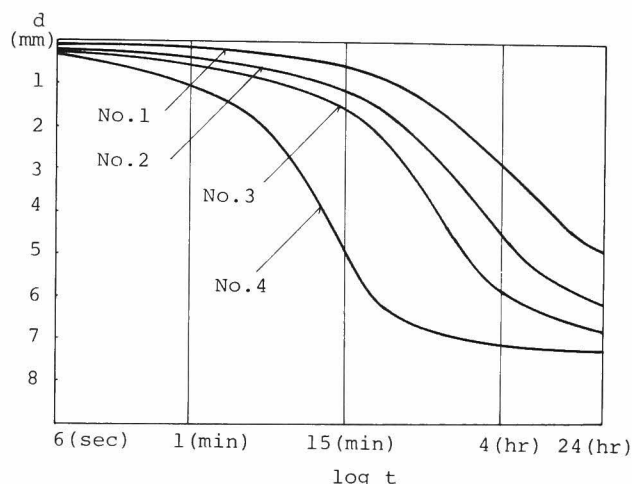


図 3-47 初期構造の相違に基づく沈下曲線の差

曲線は、圧密荷重の増大につれて 2 次圧密領域が拡大しており、圧縮がまずベッドの移動によって起こり、マクロポアの減少に伴い移動が起こりにくくなる。よってベッド内部での再配列が起こり、これが 2 次圧密に対応しているものである。つぎに図 3-48 は各試料の $e \sim \log p$ 関係をまとめたものである。No.3 試料ではさきの表 3-5 のように 8 段階の試料ごとに初期含水比を変えたが、図 3-48 では 0.1 kg/cm^2 の圧密終了時の間げき比のばらつきの差が初期間げき比のそれに対して微小であることが判る。これは飽和含水比をこえた初期含水比の変動は圧密挙動に影響を及ぼさないことを示しており、構造の相違のみに大きく依存することを表わしている。図 3-49 は Kozeny-Carman 式の構造項 $K_0 S^2$ によって構造変化を表現したものである。塩濃度の差に

よる構造変化はあまり明確にしえていないが、凝集剤による構造との差をよく表わしている。

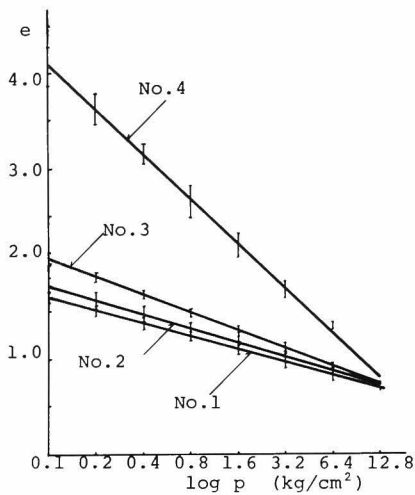


図 3-48 初期構造の異なる試料の $e \sim \log p$ 関係

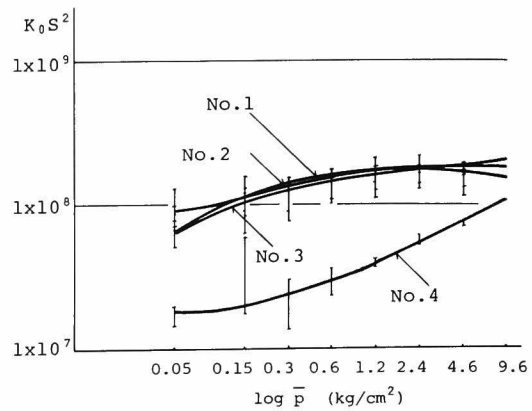


図 3-49 $K_0 S^2 \sim \log \bar{p}$ 関係

せん断試験結果をまとめたものが図 3-50 である。
同一間げき比に対してせん断強度が No.1 < No.2 < No.

3 < No.4 の順になっていることが判る。
これはある特定の大きさの粘土粒子からなる構造配列において、接触点の数は間げき比で定量的に表わされる。そして構造が同一であれば、せん断強度は間げき比に依存する。一方、凝集されたベッド粒子は粒子間引力が大であり、それだけ粒子間の間げきが大きい状態で、分散試料の低間げき比でのせん断強度に対応することを示すものである。さらにこの図からは、圧密荷重が増大し、初期構造の違いによる影響が少なくなるにつれてせん断強度の差がなくなることが知られる。

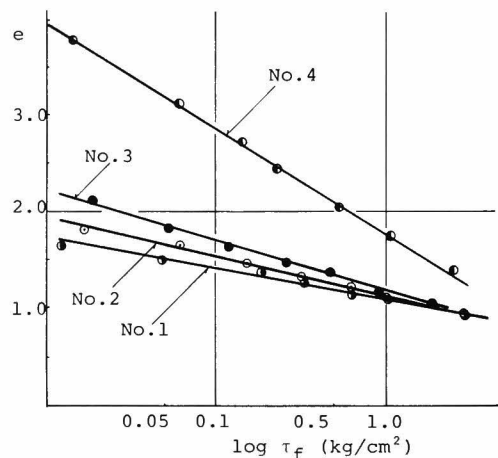


図 3-50 $e \sim \log \tau_f$ 関係

(3) 圧密時のベッドの定方向径比について

3.5.3 と同じ手法によりベッドの定方向径を測定した。ただし、ここでは観察倍率を $\times 5000$ で統一し、 $0.1 \sim 10 \mu m$ のベッドを対象として粘土粒子相互によるベッドの変形に着目して検討した。表 3-6 のとおりである。ベッド径は No.4 の凝集試料ほど大きく、また径の分布域が広いものであった。 D_{50} については、さきに微視的構造のパラメータとしての有用性を示したが、定方向径比 V/H の頻度図を示す図 3-51 から明らかである。この図でもベッドが圧密荷重の増

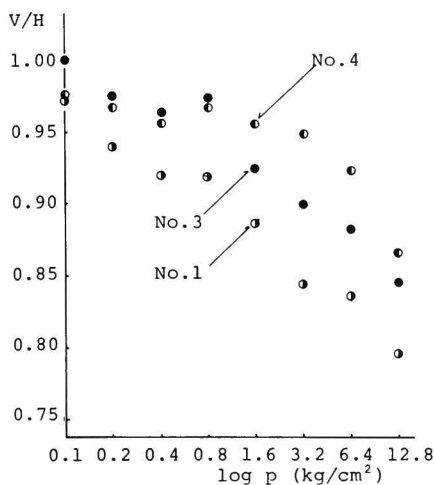


図3-51 初期構造の異なる試料のベッド D_{50} の V/H の変化

大につれて偏平化することを示している。
 またNo.1 試料では 0.1 kg/cm^2 の圧密から偏平化が起きているのに対して、No.4 試料について実験誤差のあるものの 1.6 kg/cm^2 あたりから偏平化が始まっているのが判る。この $p = 1.6 \text{ kg/cm}^2$ に対応する e

を図3-48から求めてみると約2.1である。これはNo.1 試料で $p = 0.006 \text{ kg/cm}^2$, No.3 試料では $p = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ の圧密荷重に対応し、土構造の相違を仮定した図2-27とも矛盾しない。

表3-6 D_{50} と V/H

	load (kg/cm^2)	V-size $D_{50}(\mu\text{m})$	H-size $D_{50}(\mu\text{m})$	V/H (D_{50})
No. 1 sample	0.1	3.66	3.80	0.98
	0.2	3.59	3.88	0.94
	0.4	3.66	3.80	0.92
	0.8	3.80	3.84	0.92
	1.6	3.70	4.41	0.89
	3.2	3.63	4.44	0.85
	6.4	3.56	4.41	0.84
	12.8	3.41	4.76	0.79
No. 3 sample	0.1	4.02	4.37	1.00
	0.2	3.91	4.52	0.98
	0.4	3.84	4.59	0.97
	0.8	4.02	4.48	0.98
	1.6	4.02	4.44	0.92
	3.2	4.09	4.73	0.90
	6.4	3.98	4.80	0.88
	12.8	3.84	5.16	0.84
No. 4 sample	0.1	4.84	5.44	0.98
	0.2	4.84	5.44	0.97
	0.4	4.94	5.51	0.96
	0.8	4.94	5.55	0.97
	1.6	4.84	5.48	0.96
	3.2	4.91	5.76	0.97
	6.4	4.69	5.97	0.92
	12.8	4.52	6.29	0.89

3.5.6 ま と め

粘性土の工学的挙動を微視的構造の見地から定量的に表現するための方途を述べたものである。
 本節の検討でえられた成果を整理するとつぎのとおりである。

(1) 微視的構造の定量的な表示方法として、Kozeny-Carmanの式によるもの、光学顕微鏡によるもの、相対的粒子接触によるもの、X線回折によるもの、極点図によるもの、電子顕微鏡によるもの等についての利害得失をとりまとめ、これらのうちで最も現実の姿に立脚して表現するものとして、電子顕微鏡によるものを選定することができる。

(2) 個々の粘土粒子のならび方については、粒子傾斜角頻度からベクトル和の M 値で表現し、正規圧密・過圧密時の M 値の変化が、1つの状態量として用いられることを明らかにした。

(3) さらにせん断時の挙動として、ストレスパスを M 値で表わし、せん断変形によって粒子傾斜角頻度が供試体全体としては減少することを示した。

(4) 粘性土の工学的挙動に関与する基本的単位は、実は粘土粒子の集合体であるベッドの形態をとったものであり、このベッドの出現状況と変形挙動とを明らかにした。また M 値の変化はベッド内部の粒子の挙動を示すものにはかならない。

(5) ベッドの出現状況については、沈降・圧密時の状況の観察と、定方向径を測定することによって、荷重の増大に伴ってベッドに偏平化をきたすことが知られる。

(6) さらにベッドの変形のメカニズムについては、圧密・過圧密の挙動との関連から説明を加え、1次圧密中にはマクロポアの減少、マクロベッドの変形が生じ、2次圧密ではメゾ、ミクロポアの減少ならびにメゾ、ミクロベッド内の変形に対応することを示した。

(7) ベッドと表裏一体の性格をもつポアについて検討した結果、ポア面積比を定義することによっても構造変化を表現しうることを明らかにした。

(8) 過圧密試料のポアに関する検討に基づき、除荷時の膨潤はベッドに弾性変化を及ぼすのみで、膨潤量はポア面積の増大に応じていることを示した。

(9) ポア径、ポア形状によっても、力学的作用下での圧縮変形は、微視的にはポアの細長比の増大となって生じていることが知られる。

(10) ベッドの形成は初期構造の差に基づいてきわめて急速に生じており、これは初期含水比の変動に影響されないものである。さらに圧密速度もベッド径の大きい凝集試料で大きくなることを示した。

(11) 初期構造の差によるベッド化と強度・変形の関係を検討して、ベッドの偏平化の始点を明らかにした。

3.6 結 論

本章では、超軟弱粘土の工学的性質に関する微視的考察として、粘土の構造に着目し、ベッド化を生じている粘土粒子の個々の配列、ならびにベッド全体としての形態を工学的性質との関連性から検討した。

まず第1節では、土の構造の定義とその研究の意義を明らかにした。そこでは土構造に関するこれまでの考え方を整理して、種々の作用力の結果としての土粒子の配列を表わすものが土構造であると結論している。さらに土構造の研究に関連して問題点を示し、安定処理土に対する研究における位置づけ、それに至るまでに解決しておくべき諸点をとりまとめた。

第2節では、土構造のモデルを示し、基本単位・基本モデル・実体モデルの3種類に分類して、それぞれの守備範囲を明確にすべくつとめた。特に、基本単位では団粒の呼称にそれまで混乱のみられていた多種多様の用語に対して、ベッドとポアの2種であててることを提案し、適用すべき粒径範囲を示して有用性を明らかにした。このベッドとポアはその簡潔明瞭さのゆえに、本研

究分野において近年多くの研究者によって用いられつつある。さらに、実体モデルでは多分散構造に代表されるように、現実にはベッドの集合体として生じていることが明らかになった。

第3節では、土構造の研究手法について述べている。微視的な構造を研究する場合に、分析を行う以前の問題として最も重要な項目が試料の作成方法である。ここでは、構造解析があくまで不攪乱状態での分析であることを必要条件としている。そこで走査型電子顕微鏡用の供試体作成方法を吟味して、溶媒置換による凍結乾燥法と、観察表面のためのピーリング法（接着テープならびにゼラチンによる）とを設定してその有効性を述べた。

第4節では、力学的な作用力を受けた粘性土の顕微鏡レベルでの表情として微視的構造観察結果を示している。まず単一粘土鉱物系からなる場合の例として、カオリナイトとモンモリロナイトの単一鉱物系の構造を検討した。カオリナイトでは圧密の進行に伴って、001面の発達が見られるものの、全体としてはブロック状の出現形態をとっている。また、モンモリロナイトでは粒子端部のゆがみやまくれあがりによって、力学的な作用力の差を外観上からも判別しがたいものである。このように単一粘土鉱物系の構造においても、基本モデルにいわれる単純な配向構造はとりえなく、ベッド化を生じた多分散構造とみるべき形態となっている。一方、自然粘性土における構造観察では、ベッドの形成がよくみられ、圧密・せん断時のベッドの変形の状況を示した。さらに自然粘性土の連続体マトリックス中に含まれる特殊物質として、造岩1次鉱物・ケイソウ土・有孔虫・パイライトなどの存在とその形態を明らかにした。

第5節では、これまでの定性的な土構造に関する記述を、工学的な情報として発展させるためには定量的な表現が不可欠であることを述べ、微視的考察の締めくくりとして、力学的な作用下における粘性土の構造の変化を定量的に表現したものである。そこでは個々の粘土粒子のならび方の変化を表わすことと、ベッド化をきたした土構造の全体の挙動を表わすことの2つを中心テーマとして、前者については構造項 M 値で示しうることを明らかにした。さらに後者については、ベッドとポアの2要素の変化を検討しベッドの変形のメカニズムを追究することによって、ベッドの偏平化とポアの出現状況等が明確に示された。

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎, 嘉門雅史: 粘土の構造に関する用語について, 土と基礎, 24 巻, 1 号, 1976, pp.59 ~ 64.
- 2) Ларионов, А. К. : 松尾新一郎訳: 土の構造, 山海堂, 1973.
- 3) 嘉門雅史: 粘性土の微視的構造について, 土の構成式に関する現況報告, 土質工学会論文報告集, 18 巻, 2 号, 1978, pp.73 ~ 79.
- 4) 松尾新一郎, 嘉門雅史: 粘性土の構造の表示法に関する考察, 第 8 回土質工学研究発表会講演集, 1973, pp.93 ~ 96.
- 5) Yong, R. N. and Sheeran, D. E. : Fabric Unit Interaction and Soil Behaviour, Proc. Int. Symp. Soil Structure, 1973, pp.176 ~ 183.
- 6) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. : Introduction to Soil Behavior, Macmillan, 1966.
- 7) Terzaghi, K. : Erdbau Mechanik, F. Deuticke, Vienna, 1925.
- 8) Casagrande, A. : The Structure of Clay and its Importance in Foundation Engineering, Jour. Boston Soc. Civ. Engng., Vol.19, 1932, pp.168 ~ 208.
- 9) Lambe, T. W. : The Structure of Compacted Clay, Proc. ASCE, Vol.84, SM2, 1958, pp.1654 - 1 ~ 33.
- 10) van Olphen, H. : An Introduction to Clay Colloid Chemistry, John Wiley & Sons, 1963, p.94.
- 11) Sides, G. and Barden, L. : The Microstructure of Dispersed and Flocculated Samples of Kaolinite, Illite and Montmorillonite, Canadian Geotechnical Jour., Vol.8, No.3, 1971, pp.391 ~ 399.
- 12) O'Brien, N. R. : Fabric of Kaolinite and Illite Flocculated Samples, Clays and Clay Minerals, Vol.19, 1971, pp.353 ~ 359.
- 13) Sloane, R. L. and Kell, T. F. : The Fabric of Mechanically Compacted Kaolinite, Proc. 14th Nat. Conf. Clays and Clay Minerals, 1966, pp.289 ~ 296.
- 14) Smalley, I. J. and Cabrera, J. A. : Particle Association in Compacted Kaolinite, Nature, Vol.222, 1969, pp.80 ~ 81.
- 15) Aylmore, L. A. G. and Quirk, J. P. : Swelling of Clay Water Systems, Nature, Vol.183, 1959, p.1752.
- 16) Smart, P. : Particle Arrangements in Kaolinite, Proc. 15th Nat. Conf. Clays and

- Clay Minerals, 1967, p.241.
- 17) Smart, P. : Soil Structure in the Electron Microscope, Proc. Material Conf., Wiley-Interscience, Part I, 1969, pp.249 ~ 255.
 - 18) Tan, T. K. : Report of Soil Properties and their Measurement, Proc. 4th Int. Conf. SM&FE, Vol.3, 1957, pp.87~89.
 - 19) Pusch, R. : Microstructural Changes in Soft Quick Clay at Failure, Canadian Geotechnical Jour. Vol.7, No.1, 1970, pp.1 ~ 7.
 - 20) Rosenqvist, I. Th. : Physico-chemical Properties of Soils : Soil Water System, Proc. ASCE, Vol.85, SM2, 1959, pp.31 ~ 53.
 - 21) Barden, L. and Sides, G. : Sample Disturbance in the Investigation of Clay Structure, Geotechnique, Vol.21, No.3, 1971, pp.211 ~ 222.
 - 22) Emerson, W. W. : The Structure of Soil Crumb, Jour. Soil Science, 1959, pp. 235 ~ 244.
 - 23) Pusch, R. : Influence of Salinity and Organic Matter on the Formation of Clay Microstructure, Proc. Int. Symp. Soil Structure, 1973, pp.161 ~ 174.
 - 24) Mitchell, J. K. : The Fabric of Natural Clays and its Relation to Engineering Properties, Proc. H. R. B., Vol.35, 1956, pp.693 ~ 713.
 - 25) Bowles, F. A. : Microstructure of Sediment, Investigation with Thin Sections, Science, Vol.159, 1968, pp.1236 ~ 1237.
 - 26) McGown, A. : The Nature of the Matrix in Glacial Ablation Till, Proc. Int. Symp. Soil Structure, 1973, pp.87 ~ 96.
 - 27) Dudley, J. H. : Review of Collapsing Soil, Proc. ASCE, Vol.96, SM3, 1970, pp.925 ~ 949.
 - 28) Collins, K. and McGown, A. : The Form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils, Geotechnique, Vol.24, No.2, 1974, pp.223 ~ 254.
 - 29) Brewer, R. : Fabric and Mineral Analysis of Soils, John Wiley & Sons, 1964.
 - 30) Lafeber, D. : Soil Structure Concepts, Eng. Geology, Vol. 1, No.4, 1966, pp. 261 ~ 290.
 - 31) McConnachie, I. : Fabric Changes in Consolidated Kaolin, Geotechnique, Vol.24, No.2, 1974, pp.207 ~ 222.
 - 32) Smart, P. : Pore Size Distribution, Geotechnique, Vol.25, 1975, p.412.
 - 33) Yong, R. N., Sheeran, D. E. and Nagaraj, T. S. : Soil Composition Control of

- Fabric and Response Behaviour, Proc. Int. Clay Conf., 1975, pp.663 ~ 672.
- 34) 水渡英二, 滝山一善: 電子顕微鏡分析, 分析ライブラリー 15, 1971, pp.14 ~ 15.
- 35) Ladd, C. C. and Lambe, T. W. : The Strength of "Undisturbed" Clay Determined from Undrained Tests, Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, STP, No. 361, 1963, pp.342 ~ 371.
- 36) Matsuo, S. and Kamon, M. : Microscopic Research on the Consolidated Samples of Clayey Soils, Proc. Int. Symp. Soil Structure, 1973, pp.194 ~ 203.
- 37) Olsen, H. W. : Hydraulic Flow through Saturated Clay, Proc. 9th Nat. Conf. Clays and Clay Minerals, Vol.19, 1962, pp.131 ~ 161.
- 38) Wu, T. H. : Geotechnical Properties of Glacial Lake Clays, Trans. ASCE, Vol. 125, 1960, p.994.
- 39) Morgenstern, N. R. and Tchalenko, J. S. : Microstructural Observations on Shear Zones from Slips in Natural Clays, Proc. Geotechnical Conf., Oslo, Vol.1, 1967, pp.147 ~ 152.
- 40) Meade, R. H. : X-ray Diffractometer Methods for Measuring Preferred Orientation in Clays, U. S. Geological Survey, Paper 424B, 1961, pp.B273 - B276.
- 41) Martin, R. T. : Quantitative Fabric of Wet Kaolinite, Proc. 14th Nat. Clay Conf., 1966, pp.271 ~ 287.
- 42) Quigley, R. M. and Thompson, C. D. : The Fabric of Anisotropically Consolidated Sensitive Marine Clay, Canadian Geotechnical Jour., Vol.3, No.2, 1966, pp.61 ~ 73.
- 43) Yoshinaka, R. and Kazama, H. : Microstructure of Compacted Kaolin Clay, Soils and Foundations, Vol.13, No.2, 1973, pp.19 ~ 34.
- 44) Lafeber, D. : Soil Fabric and Soil Mechanics, Soil Micromorphology, Ed. by Jongerius, Elsevier, 1964, pp.351 ~ 360.
- 45) Borodkina, M. M. and Osipov, V. I. : Automatic X-ray Analysis of Clay Micro-fabrics, Proc. Int. Symp. Soil Structure, 1973, pp.15 ~ 20.
- 46) Foster, R. : Analysis of Soil Microstructure, Proc. Int. Symp. Soil Structure, 1973, pp.5 ~ 14.
- 47) Tovey, N. K. : Quantitative Analysis of Electron Micrographs of Soil Structure, Proc. Int. Symp. Soil Structure, 1973, pp.50 ~ 57.
- 48) Curran, J. R. : Analysis of Two-dimensional Orientation Data, Jour. Geology, Vol.64, 1956, pp.117 ~ 131.

- 49) Matsuo, S. and Kamon, M. : Microscopic Study on Deformation and Strength Characteristics of Clay Soil, Proc. 9 th Int. Conf. SM&FE, Vol.1, 1977, pp.201 ~ 204.

第 4 章 土中有機物と土質安定

4.1 土中有機物について

4.1.1 土中有機物の種類と分類

一般に土中有機物は、動植物の遺体、分泌物、微生物、及びそれらの分解生成物ならびに未分解の混合物で構成され、総体に対しては腐植（Humus）と呼ばれている。¹⁾

熊田（1965）によれば、²⁾生物遺体の形で土中に入った有機物は図 4-1 のような分解過程を経るとされている。すなわち生物遺体を構成する有機化合物は、土中で最初に受ける変化として微生物による分解作用を受けるが、この分解の難易から 2 種のグループに分けて考えられる。炭水化物、蛋白質は分解が早くから進み、その結果構成成分の一部は H_2O 、 CO_2 、 NH_3 などの無機化合物に分解される。残りの分解産物は、一部は微生物によって再合成され、微生物体構成成分や代謝産物となり、この中からキノイド性物質、アミノ酸、蛋白質を主体として縮合反応が生じることによって初生腐植物質ができる。一方、タンニン様物質やリグニンなどのように比較的分解を受けにくいものは、初生腐植物質ができてくる段階でもなお生物体組織中に残っているが、これらも分解の後期には微生物により芳香族化合物、特にポリフェノール、キノン系物質にまで一度分解されたのち、初生腐植の縮合生成に関与する。このようにして生じた初生腐植物質は土中でさらに酸化的重縮合、あるいは微生物による酸化的解裂反応を経て、安定で土に固有な暗褐

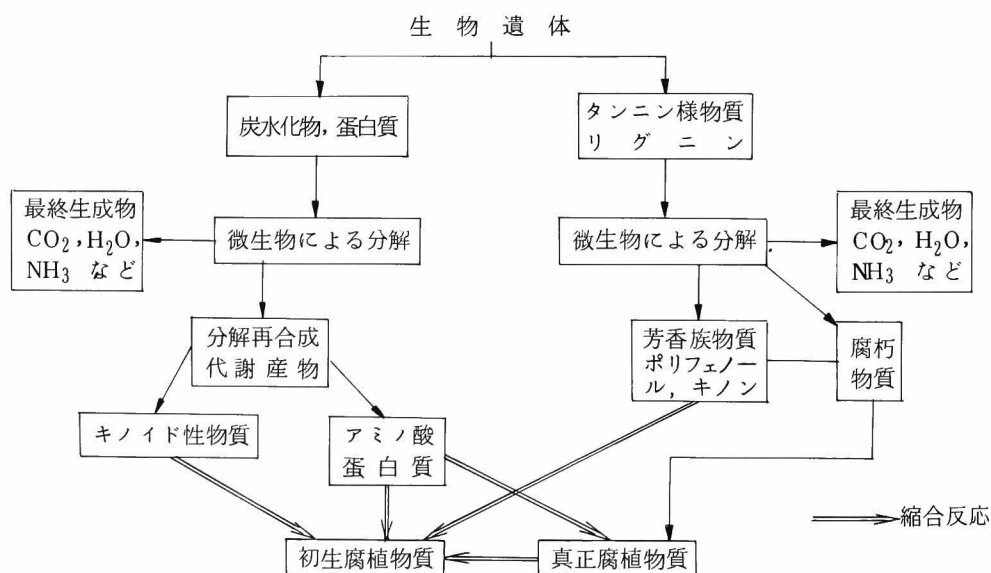


図 4-1 生物遺体の腐植化と無機化

色ないし黒色の有機物、すなわち真正腐植物質と呼ばれるものとなる。

有機物は完全に分解されると H_2O 、 CO_2 、 NH_3 などになり、あとに少量の灰分が残るが、わが国のような温帯地方の海底浅海部は、陸地からの有機物の供給が多く、海底微生物による分解作用とあいまって腐植の生成に好条件となっている。

この土中有機物の主体をなす真正腐植物質は、自然条件下で生成した複雑な組成の非晶質有機重縮合物であるから、その構造の解明は困難であり、必ずしも明確にされているといえない。多くの研究により、次のような主要構造単位をもつものであろうと推定されている。

- ・フェノール、キノン、アミノ酸、ペプチド (Kononova, 1961)³⁾
- ・フェニルプロパン、アミノ酸、ペプチド (Flaig, 1964)⁴⁾
- ・フェニルプロパン、フラボン (Hurst と Burges, 1967)⁵⁾

このうち、フェニルプロパン単位とフラボン単位は、それぞれ微生物による分解が困難なりグニン、及びタンニン様物質の構成単位に相当している。

以上述べたように腐植は種々の物質の複雑な系の混合体であるため、その分類は色や抽出剤に対する応答性などに基いている。代表的な分類法として Sprengel の方法を改良した図 4-2 のような手法があり、⁶⁾ 本研究ではこの分類法に準じている。

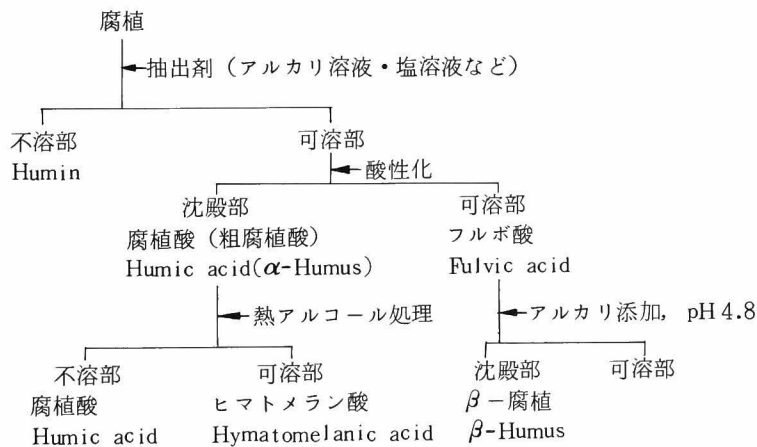


図 4-2 腐植分類法

ところで、このような土中有機物の分解過程は、すでに簡単にふれたように土中の微生物の作用と表裏一体をなすものである。よって以下には土中微生物の種類と作用とについてまとめている。

4.1.2 土中微生物の種類と作用

土中の微生物はその分布範囲、数ともにきわめて大きく、その存在しない場所を見出すのは困難である。微生物分布を定量的に示すものとして表4-1

表4-1 土壌中の微生物の一例($\times 10^4/g$)

土 壌 (pH)	細 菌	放線菌	糸状菌
未 処 理 土 壌(4.6)	300	115	6.0
石 灰 添 加 土 壌(6.4)	521	241	2.2
カ リ 磷 酸 土 壌(5.5)	516	152	3.8
堆肥およびカリ磷酸土壌(5.4)	880	292	7.3
硫安およびカリ磷酸土壌(4.1)	269	37	11.0

の例がみられる。⁷⁾これは種々の処理条件下における土1g中の微生物数であるが、およそ $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8$ 個の微生物が存在するとされている。

またその作用も多岐多様にわたっているため、分類上も種々雑多な特性をもった微生物群の集りである。図4-3は生物

界における位置を示している。⁷⁾代表的微生物群として、細菌、放線菌、菌類藻類、原生動物の5種をあげることができる。

(1) 代表的微生物群⁸⁾

(i) 細菌 (Bacteria)

一般に幅 $0.5 \sim 2.0$

μm ぐらいで分裂によって増殖する。その外形によって球菌、桿菌、らせん菌、コンマ菌、有柄菌、

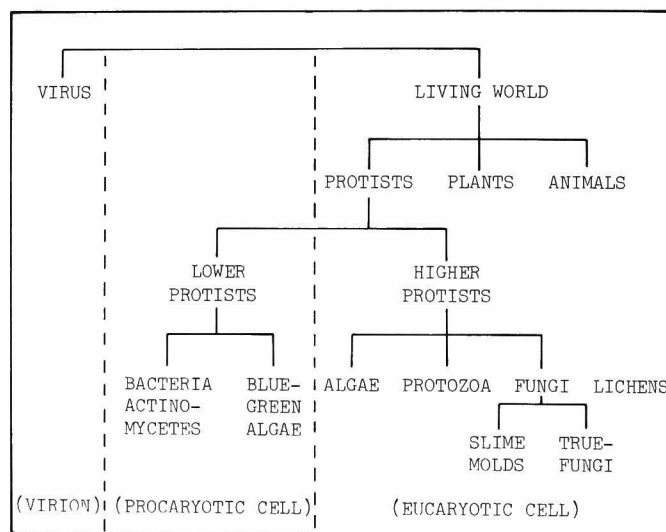


図4-3 微生物の分類

発芽菌、分枝菌などに区別される。細菌の分類には形状のほかべん毛の有無も重要であり、極べん毛、周べん毛がある。いろいろな色素によって染色が行われるが、最も著名なグラム染色法で染まる細菌をグラム陽性菌、染まらない細菌をグラム陰性菌とよんでいる。有機物の酸化によって生育に必要なエネルギーをうる一般の有機物栄養細菌（従属栄養菌）に対して、無機物の酸化によってエネルギーをうる無機栄養細菌や太陽エネルギーを利用できる光合成細菌（独立栄養菌）などが存在する。

(ii) 放線菌 (Actinomycetes)

直径 $0.5 \sim 0.8 \mu m$ の長い分枝状の単細胞の菌糸から成り立っている。これらの菌糸は栄養となる物質の表面や空中へも繁茂する。前者は栄養菌糸、後者は気菌糸であるが、これらの菌糸は

連鎖状あるいは単独で孢子や孢子のうを形成する。放線菌の大部分は土から分離されるが、ストレプトマイシンは放線菌のつくり出す抗生物質として著名のものである。

(iii) 菌類 (Fungi)

菌類の大部分は長い糸状の菌糸からできており糸状菌とよばれる。菌糸の直径は普通 $2 \sim 10 \mu m$ で、菌糸から孢子のう柄ができ、その先端に多数の孢子を入れた孢子のうが形成される。糸状菌は有性および無性の増殖方法によって増殖する。

(iv) 藻類 (Algae)

藻類はいずれも光合成を行うことができる。それぞれ特殊の色素、クロロフィルその他の色素をもっている。藍藻は遊離の窒素を固定できる無機栄養微生物で、湿潤な土に数多くみとめられる。

(v) 原生動物 (Protozoa)

土中の原生動物はアメーバ、有殻根足虫、べん毛虫、繊毛虫などに分類される。これら原生動物はその生活環境として水中が最も活動しやすく、土の水分条件に影響を受けやすい。

(2) 微生物の栄養源⁷⁾

(i) 炭素源

従属栄養菌は一般にエネルギー源および細胞構成物質として有機炭素源を必要とする。炭素源としては主として炭化水素が利用される。生育のための適当な糖濃度は、通常細菌で $0.5 \sim 2\%$ 、酵母およびカビで $1.0 \sim 10\%$ である。より高い糖濃度では微生物の生育は阻害される。

(ii) 窒素源

細胞蛋白質の合成などのために窒素源を利用する。窒素源としては空中窒素、 NH_4 塩、 NO_3 塩、尿素、アミノ酸などが種類に応じて利用される。通常使用される濃度は $0.1 \sim 0.5\%$ である。

(iii) 無機塩類

少量の無機塩類が微生物の生育に不可欠で、そのうち P, K, Mg, S は他の元素より多い量が必要である。通常培地には KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 および $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ として供給される。

(iv) 生育因子

以上の栄養源のほかに、ある種の抽出液を加えることによって微生物の生育を著しく促進することがあり、この生育因子をビオス (Bios) とよばれている。ビタミン、ニコチン酸などはその 1 種である。

(3) 生育に及ぼす環境とその影響

(i) pH

すべての微生物には各々生育に最も適したかなり狭い範囲の pH がある。これを至適 pH という。一般に酵母およびカビは、微酸性を好み至適 pH は $4.0 \sim 6.0$ である。しかし pH がこの範囲外であ

っても生育度が弱くなるだけで、全く生育しなくなる訳ではない。細菌および放線菌は、一般に中性ないしアルカリ性を好み、その至適 pH は 7.0 ～ 7.5 である。

(ii) 温 度

通常微生物の生育温度範囲は 0 ～ 70℃ である。0℃ に近い低温は微生物を死滅させないのでその保存に適している。

(iii) 酸 素

微生物の生育に対する酸素要求はその種類によって異なる。生育に酸素を要求する菌は好気性菌、全く必要としない菌は絶対嫌気性菌、あってもなくても生育する菌は通性嫌気性菌と称される。

(iv) 光線および放射線

可視光線は光合成細菌によって利用されるが、一般微生物には有害である。

(4) 生育曲線

微生物の生育過

程において、時間を横軸、全菌数あるいは生菌数を縦軸にプロットすると、生育速度が時間とともに変化し、図 4-4 のような誘導期、対数期、停止期、死滅期よりなる生育曲線がえられる。

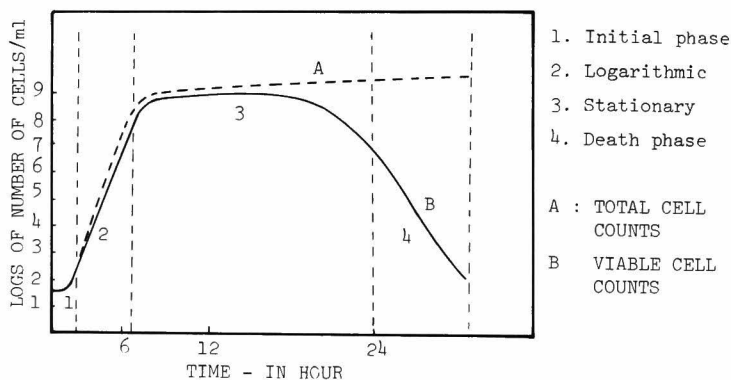


図 4-4 微生物の生育曲線

(5) 微生物の土質工学的作用

土中微生物の土質工学的な作用は、そのベッド化作用に要約しうるものと予想される。それは微生物自体の菌糸等による連結作用、ならびに微生物の代謝による分泌物や代謝後の遺骸などの有機物によるベッド化の2種が考えられる。前者は物理的に連結するのみであり、後者はイオン交換反応、極性吸着などによって、粘土有機物複合体を形成する可能性をもっている。そこで次項では、粘土有機物複合体の機能についての過去の研究成果をとりまとめておきたい。

4.1.3 土中有機物の機能

(1) 粘土有機物複合体について

粘土はある種の有機物と複合体を形成する。Nahin(1963)⁹⁾は、粘土有機物複合体とは、ある種の粘土鉱物とある種の有機分子との化学的結合による反応生成物であると定義している。有機物と粘土との相互反応の要因として、Beutelspacher (1955)¹⁰⁾は次のようなものを示している。

- 粘土鉱物の種類と化学的組成
- 層面の荷電状態
- 層面に存在する無機陽イオンの種類と量
- 有機物の種類と形状、大きさ
- 極性基の存在の有無

これに対して、さきにふれたように土中有機物の腐植は、その物理化学的性質として

- 酸、COOH基、フェノール性OH基をもつ
- 両性体として作用する
- 塩基置換ならびに塩基保持能力が大きい

などの特性をもっている。よって一般に有機陽イオンがイオン交換反応で粘土と結合し、有機性有機物が極性吸着で結合することが考えられる。¹¹⁾

まず、イオン交換反応とは次のようである。モンモリロナイトの負電荷と塩基性アミノイオンを有する有機物の反応であり、これは粘土の交換座において、静電力と van der Waals 力の両方によって起こる。また Bradley や Grim は、 $C-H\cdots O$ (粘土表面) の水素結合も関係しているとしている。大きな有機陽イオンが van der Waals 力によって吸着されると、吸着量は粘土の CEC より大きくなることもある。また Hendricks によればモンモリロナイトの交換座の面積よりも有機陽イオンが大きい場合には、有機物は粘土の置換性水素と部分的に置換し、置換されていない水素を含む粘土表面を大きな有機物がおおうことがあるとされている。これらの影響として、①結晶のC軸の膨張、②吸着水の変化、③粘度の変化などが生じる。

さらに有機性分子の吸着とは次のようである。粘土鉱物は有機性であり、一方多くの有機物は双極子となっている。そのため、粘土が有機物を含む溶液に接すると、粘土の正、負電荷の中心は、溶液中の有機性分子の負、正電荷の中心をひきつけ極性吸着がおこる。極性吸着ではすでに粘土表面に吸着されていたイオンを当量的に置換浸出しない。また、粘土鉱物の層間に数分子層の有機物を吸着しうるが、これは吸着エネルギーに左右され、有機物分子の非極性部分が大きくなるに従って吸着エネルギーが減少するため、単分子層しか層間に入らなくなるとされている。

粘土有機物複合体の構造については以下の報告がみられる。

Michaels(1958)¹²⁾は図4-5のような粘土粒子間の長鎖ポリマー架橋の存在を示している。これは低濃度のポリマー溶液中におけるカオリナイトの大きな綿毛化の説明に有意である。

Wattら(1962)はカルボキシル基のような陰イオンとアミドグループのような陽イオンをもつ

両性有機物が、モンモリロナイトなどに吸着された場合、アミドグループは粘土鉱物の層面の酸素と水素結合しカルボキシル基は結晶端部あるいは破壊部のアルミニウムと結合 ($-COOAl$) するとした。¹¹⁾

Greenland(1971)¹³⁾ は互に反発すると考えられていた有機物陰イオンと雲母のような負電荷の粘土粒子の表面との反応について、図4-6に示すような交換性

陽イオンを通
しての2種の
結合の型を示
している。ま
た粘土粒子の
含水酸化物お
よび粒子端部
での反応につ

いて、図4-
7に示すよう
な陰イオン交
換反応、配位
子交換反応に
よる結合の型
を提案してい
る。

従って粘土粒子と有機物の結合としては、層間吸着の場合を除いて、図4-8に示すような3種のタイプの単位を考えることができる。この3種のタイプと層間への有機物の吸着とが組み合さって複合体を形成するので、有機物の質と量とを変えることによって、複合体の形と大きさを変化させう

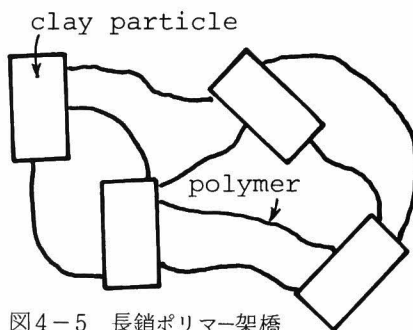


図4-5 長鎖ポリマー架橋

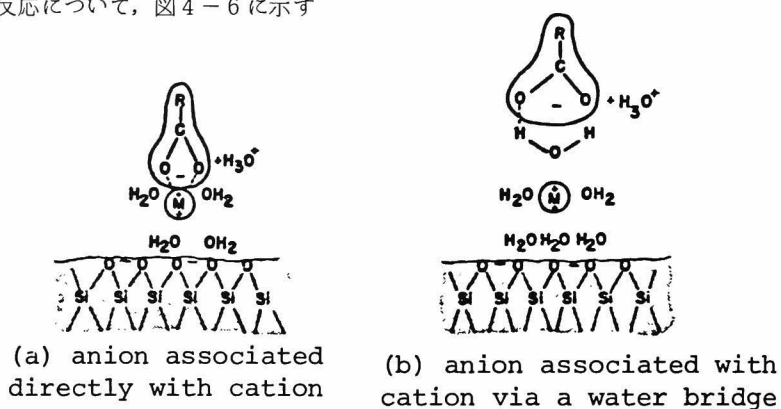


図4-6 陰イオンと雲母型粘土表面との相互作用

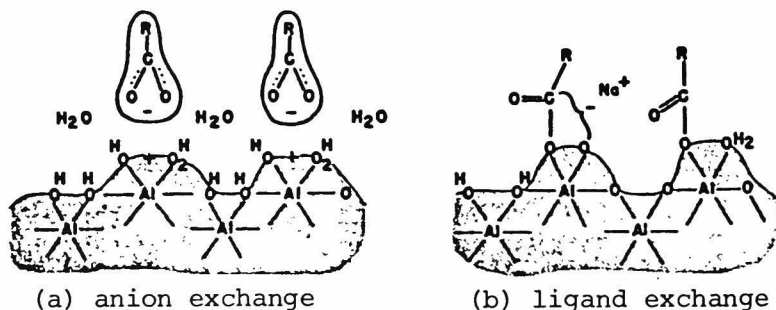


図4-7 陰イオンと含水アルミ酸化物表面の相互作用

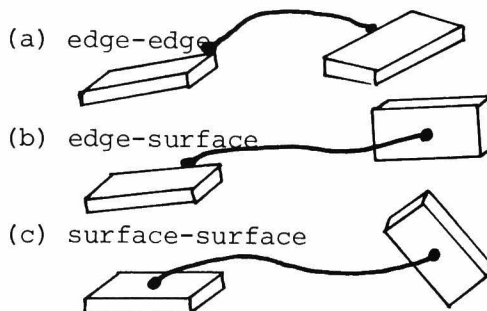


図4-8 粘土と有機物の結合タイプ

る可能性がある。

以上述べたように、粘土有機物複合体は土中の微生物の分解作用を経て生じた腐植によって、イオン交換や極性吸着などを受け、土粒子間の架橋を形成しベッド化を生じているものである。

(2) 微生物によるベッド化作用

微生物の土中における作用として、特に土質工学上その有効性が期待されうるものとしてベッド化作用があげられる。

Waksman ら (1939)¹⁴⁾ や Peele (1940)¹⁵⁾ は菌類と細菌が土粒子を耐水性のベッドに結合させることを示しており、これは細菌が粘性物質を分泌する機能をもつとともに、菌類の菌糸が土粒子をかためるとするという仮説にもとづいたものである。その後、多くの研究者(例えば、Harris ら (1966)¹⁶⁾ の総括参照)によって微生物の種類とベッド化特性について検討がなされており、McCalla ら (1957)¹⁷⁾ はベッド化効果の順序として菌類>ガム生成細菌>ある種の細菌>酵母>その他の細菌であることを示している。さらに、有機物が土中に存在することによる土粒子のベッド化は、微生物が有機物を容易に分解しうるかどうかに依存していることが報告されている。Martin ら (1959)¹⁸⁾ によれば、有機物のベッド化効果は、それらの分解速度と性状にもとづいて、分解が速く進行するほど結合効果が増大する。高度に微生物活動が良好な条件では、土中の有機物が土の結合物質(粘性物質)へと急速に変化することが可能となり、土のベッド化速度も著しく増加する。以上を要約すると、適当なエネルギー源が存在する中で、微生物は土粒子を耐水性ベッドに変化させるが、それは微生物の代謝産物として結合物質の生成に基づくものであり、これがさきに述べた粘土有機物複合体を形成する1つの大きな要因となるものと考えられる。

以上の機能・作用は、軟弱粘土の改良ならびに安定上きわめて有効であることが予想され、次節以降においてこれら有機物による化学的安定処理土の物性の改良効果を明らかにして、土質安定への展開を行うものである。

4.2 土中腐植による化学的土質安定処理土の工学的性質とその改良のメカニズム¹⁹⁾

4.2.1 試料調整法

土中の有機物含有量を人為的に調整し、これら土中腐植による軟弱粘土の工学的性質の変化を追求して、有機物による化学的土質安定処理への展開のための原点を探るものである。前節で述べたように、土中の腐植物質はその抽出性状によって各種の分類がなされている。そこで本節では、土中にもともと存在する有機成分の工学的性質に及ぼす影響、ならびに比較の取り扱いやすい土中腐植酸を分別抽出して軟弱粘土中に添加することによる影響について検討するものである。すなわち、有機物総量の変化が土性に及ぼす影響とともに、有機成分の種類の差による影響とを併せて追求している。

(1) 有機物（腐植酸）の精製法

自然粘性土としては大阪南港粘土を用いたが、腐植酸もこの粘土から抽出した。抽出精製の方法は以下のとおりとした。

(i) 腐植酸の抽出

湿潤状態の南港粘土を 10 g に対して、0.5 N NaOH 100 cc の割合で添加し、混合分散させ、時々攪拌しながら 48 時間以上放置する。この分散液を遠心分離すると褐色の腐植抽出液を得る。沈殿した粘土に蒸留水を加え、攪拌分散後同様に遠心分離する。この水洗操作を 2 回行い、洗液は先の抽出液と合せる。こうして得た腐植の NaOH 溶液を 0.5 N HCl で弱酸性とし、黒褐色コロイド状の腐植酸を沈殿させる。十分に沈殿させた後、遠心分離によって水洗を 2 回繰返す。こうして得た腐植酸を添加有機物として用いる。

(ii) 腐植酸の精製

さらに腐植酸と粘土粒子の結合メカニズムの検討のために、腐植酸に吸着している余剰カチオン、アニオンを除去する必要がある、そのための精製を堀・奥田の方法²⁰⁾を参考に行ったものである。それにはイオン交換樹脂（アンバーライトの IR-120（強酸性カチオン交換）、IRA-400（強塩基性アニオン交換））を用い、アルカリ溶解の腐植酸を 0.2 mg/cc 以下の濃度で 2~4 cc/min の速度で交換樹脂を通した。これによって pH 2~4 の腐植酸を得て、真空濃縮して試料とする。これらの抽出・精製法を流れ図で示すと図 4-9 のようである。

(2) 有機成分処理土の作成方法

つぎに示す 2 つの方法によって有機物処理を行った。

(i) NaOH-処理

湿潤土 1 kg に 0.5 N-NaOH 溶液 10 ℓ の割合で採取し、よく分散させる。時々攪拌しながら 48 時間放置。その後遠心口過する。蒸留水で洗浄後沈殿物を 0.1 N-HCl で中和して中性化し、この時の過剰塩分を蒸留水で洗浄、再び遠心口過する。このようにして NaOH（アルカリ）条件で溶出する腐植分を除去した有機成分処理試料を得る。

(ii) H₂O₂-処理

湿潤土 1 kg に 5 % H₂O₂ 溶液 10 ℓ の割合で添加する。これを 80 °C にまで加熱して約 18 時間保持して有機物を酸化させる。冷却後蒸留水にて洗浄し遠心口過する。このようにして H₂O₂ で酸化される腐植分を除去した有機成分処理試料を得る。このときが最も有機物総量の少ない試料となる。

これら処理土に、前項で得られた精製腐植酸を表 4-2 のような配合で添加し、供試体としたものである。なおこれら供試体について、熊田らの方法によって有機物の分別抽出を行い、全有機物含有量とともにその構成腐植の形態をまとめたものが表 4-3 である。表中の⑩は腐植の抽

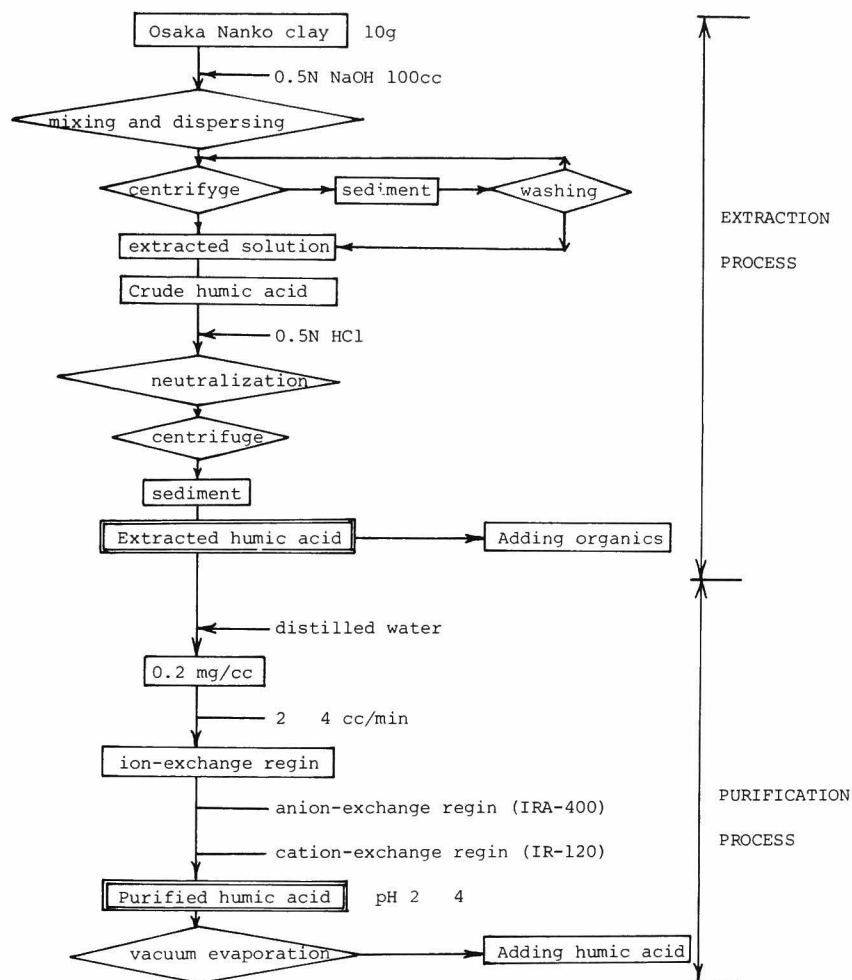


図 4-9 腐植酸の抽出精製法

表 4-2 有機物処理土の条件

Sample No.	Organic content (%)	Treating method
N-1	1.62	H ₂ O ₂ -treatment
N-2	1.96	
N-3	2.69	
N-4	4.09	NaOH-treatment
N-5	4.47	
N-6	5.09	untreated

出率を示し、処理土が40%未満であることから、酸・アルカリへの反応性の少ないものが過半数を占めていることを意味している。

表4-3 含有有機物の総量と抽出による分別（試料粘土3gあたり）

	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
1. Organic content (%)	1.62	1.96	2.69	4.09	4.47	5.06
2. Organic matter (mg)	48.6	58.8	80.7	122.7	134.1	151.8
3. Free-type humin (mg)	8.3	11.6	14.3	17.4	19.4	22.7
4. Free-type humic acid (mg)	2.5	4.2	6.6	8.8	10.3	15.2
5. Free-type fulvic acid (mg)	5.8	7.4	7.7	8.6	9.1	7.5
6. Bonding-type humin (mg)	5.6	7.4	12.3	10.2	14.0	15.6
7. Bonding-type humic acid (mg)	1.2	2.8	6.7	4.7	8.0	9.8
8. Bonding-type fulvic acid (mg)	4.4	4.6	5.6	5.5	6.0	5.8
9. Total humin (mg)	13.9	19.0	26.6	27.6	33.4	38.3
10. Extracted percent (%)	28.6	32.3	33.0	22.5	24.9	25.2
11. Free-type percent (%)	59.4	61.1	53.8	63.0	58.1	59.3
12. Total humic acid percent (%)	26.6	36.8	50.0	48.9	54.8	65.3
13. PQ1 (%)	30.1	36.2	46.2	50.6	53.1	67.0
14. PQ2 (%)	21.4	37.8	54.5	46.1	57.1	62.8

NB. * Free-type: extracted by NaOH
 * Bonding-type: extracted by $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$
 * Free-type percent: 3/9
 * Total humic acid percent: (4+7)/9
 * PQ1: 4/3
 * PQ2: 7/6

4.2.2 有機成分処理土の工学的性質

有機成分処理土の工学的性質の変化について、土粒子比重、コンシステンシー、圧密特性、強度特性を取り上げ、有機物含有量の変化に基づく影響を検討している。

(1) 土粒子比重

有機物の含有量の差によって土粒子比重が変化するとされている。比重ビン法を用いて測定された結果は図4-10のとおりである。土粒子無機成分の比重を G_1 、有機成分の比重を G_2 、有機物含有量を $P(\%)$ とすれば、有機成分処理土の土粒子比重 G_s は、次式で与えられる。

$$G_s = \frac{G_1}{\left(\frac{G_1}{G_2} - 1\right) \frac{P}{100} + 1}$$

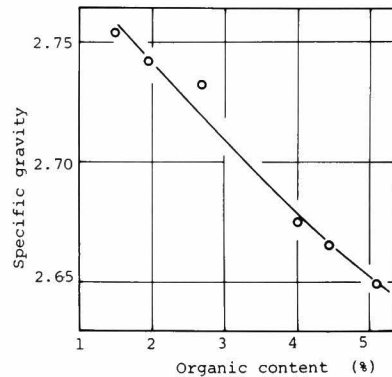


図4-10 土粒子比重の変化

図の結果を代入すると $G_1 = 2.821$ 、 $G_2 = 1.231$ となり、無機成分、有機成分ともにはほぼ合理的な値がえられる。これらの値は、軟弱粘土試料の種類（鉱物の母岩の相違及び有機物の種類）によって異なることはいうまでもない。

(2) コンシステンシー特性

図4-11はコンシステンシー特性の変化を表わしている。有機物含有量が増すにつれて、液性限界 w_L 、塑性限界 w_p ともに上昇する。特に w_L は有機物量の変化(4%)で30%の相違をみせている。有機物含有量 P (%) の関数で示す。

$$\begin{aligned} w_L &= a_1 + b_1 P \\ &= 53.4 + 5.4 P (\%) \end{aligned}$$

となり、 $a_1 = 53.4(\%)$ が対象とした南港粘土が有機物を含まないときの w_L を示している。これに対して w_p にはそれほど変化はみられないが、結果として塑性指数 I_p は大きく増加している。これは有機物量の増大に伴って、腐植の持つ高い活性に基づく保水性によるものであり、かつ有機物が粘土粒子の凝集、ペッド化に関与して、せん断抵抗を高めているためと考えられる。

(3) 圧密特性

側方拘束1次元圧密試験から求めている。まず圧縮指数 C_c については図4-12のように有機物と線型関係にあり、次式のようになる。

$$C_c = 0.045 P + 0.340$$

これは、さきの w_L との関連で示すと、

$$C_c = 0.008 (w_L - 12)$$

のようになり、Ske-

mptonの慣用式とはほぼ一致する。有機物は図のように C_c を増大させるため、有機成分処理土の圧密沈下量は大きくなるものである。圧密係数 c_v 、ならびに透水係数 k はそれぞれ図4

-13、4-14に表わ

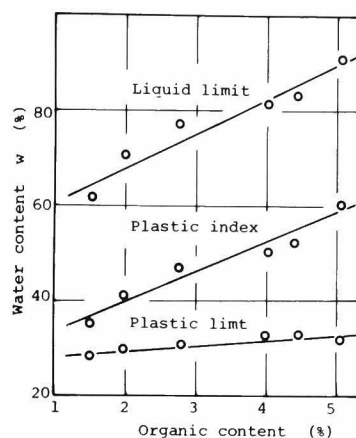


図4-11 コンシステンシー特性

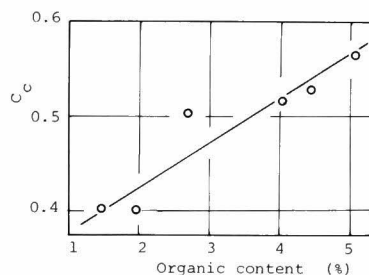


図4-12 圧縮指数の変化

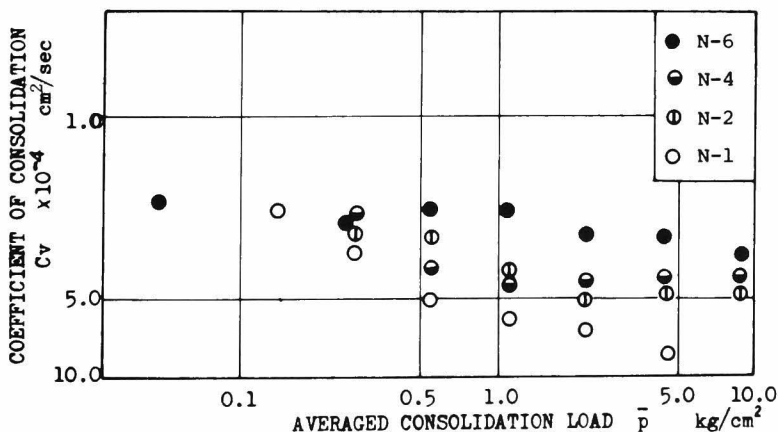


図4-13 圧密係数の変化

されている。有機物総量の増加によって c_v , k とともに減少している。以上の作用は、4.1 で示したような粘土有機物複合体の存在（特に粘土粒子と有機物との陽イオン架橋がその有力な結合作用と予想される）の結果、圧密を遅延させているためと考えられる。さらに時間効果として2次圧密について検討すると次のようになる。2次圧密については、Lo(1961)²¹⁾によれば3つのタイプに分類され、有機質土ではTerzaghiタイプの2次圧密を考えることは危険である。しかしながら、

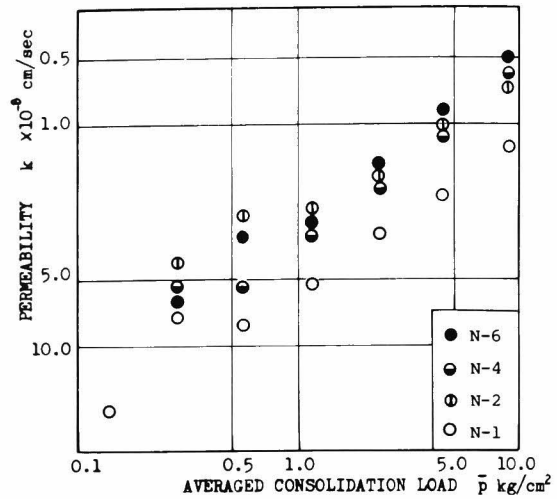


図4-14 透水係数の変化

ここで用いた有機成分処理土のような含有量では沈下一時間曲線をみても Terzaghi タイプとみなしうするため、2次圧密量の表示としてひずみ-時間曲線における $t=24$ 時間での傾き $d\epsilon/d\log t$ で整理した。いま圧密荷重 $P = 1.6, 3.2 \text{ kg/cm}^2$ の場合を有機物含有量 P の変化とともに表わせば図4-15のようになる。2次圧密は有機物含有量とともに増大して、時間効果が大きくなっている。2次圧密は間げき水圧の消散後のベッドの再配列によって生じるが、この図は、その要因として有機物の影響も大きいことを示している。図のような放物線近似をすれば次式のようなになる。

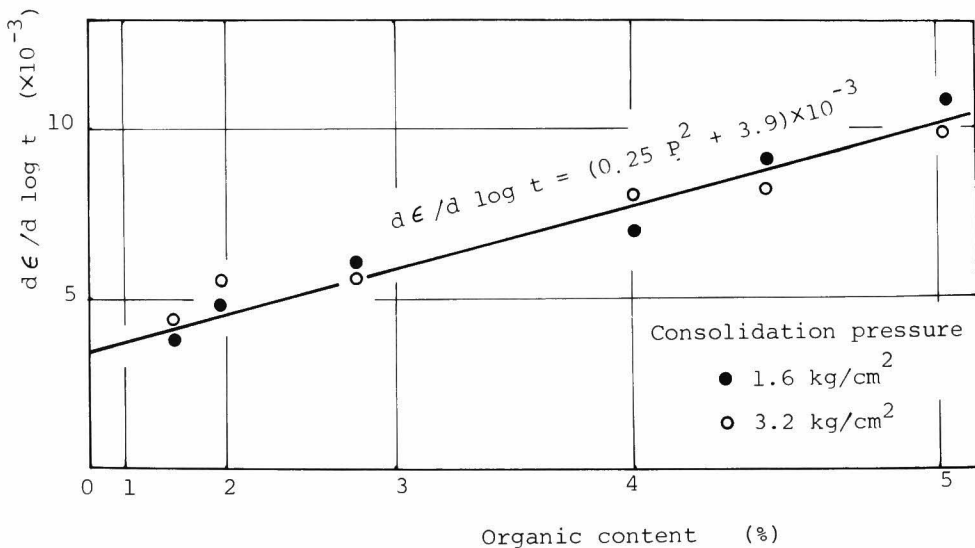


図4-15 2次圧密特性

$$\frac{d\varepsilon}{d \log t} = a_2 + b_2 p^2$$

$$= (3.9 + 0.25 p^2) \times 10^{-3}$$

ここで、 a_2 は有機物を含まないときの2次圧密度で、土試料の種類と吸着水に依存するもので、 $b_2 p^2$ が粘土-有機物の接着作用によるものである。

(4) 強度特性

強度特性としては等体積一面せん断試験を行って検討した。このときのベクトルカーブを図4-16、4-17に示しているが、有機物は粘性土のダイレイタンスーを高める作用を及ぼしている。最大せん断強度 τ_{\max} を $p_0 = 6.4 \text{ kg/cm}^2$ のときに対して示すと図4-18のようになり、有機物は強度増大の作用をはたしている。なお c_u/p をそれぞれ整理すると図4-19のようであり、強度増加率も大きくなっていることが明らかである。

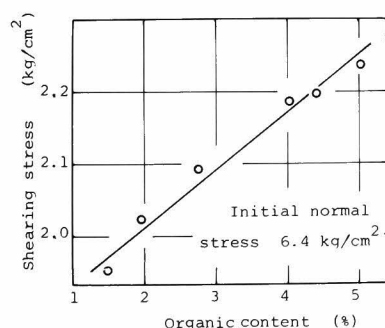


図4-18 最大せん断強度の変化

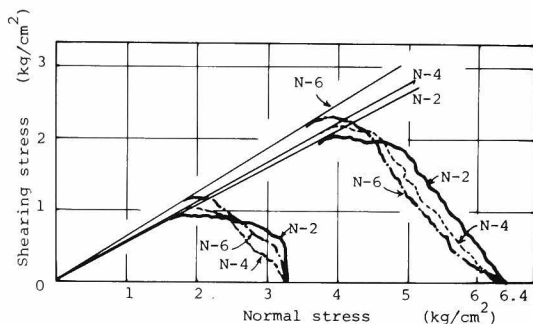


図4-16 せん断特性 ($p_0 = 6.4, 3.2 \text{ kg/cm}^2$)

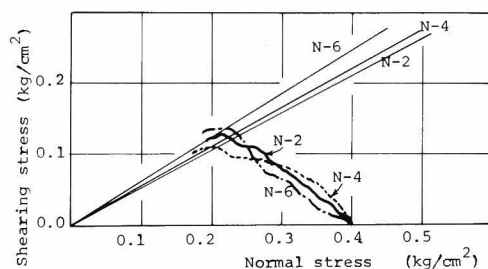


図4-17 せん断特性 ($p_0 = 0.4 \text{ kg/cm}^2$)

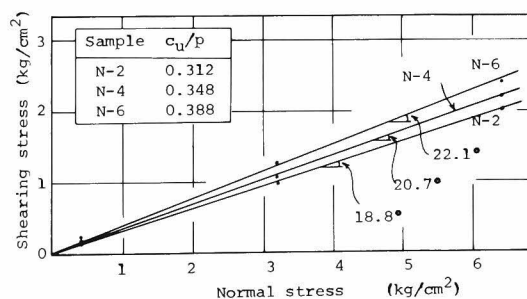


図4-19 c_u/p の変化

4.2.3 有機成分処理土の改良のメカニズム

4.2.2 で示したように、有機物の総量の変化は軟弱粘土の工学的性質を大きく変化させるものである。このような物性の変化の原因として、有機物と粘土との陽イオン架橋の存在の可能性、有機物の高い保水性と界面活性、それに基づく土粒子のペッド化作用などを予想した。本項では、これらのメカニズムを明らかにして、その論拠を与えることを目的とするものである。

そこで、ここでは試料として単一粘土鉱物系のカオリナイトとモンモリロナイトとを追加して有機物との反応性を調べ、南港粘土のような自然粘性土における反応性の推定に供している。まず処理土の界面特性として塩基置換容量 C E C を測定し、さらに有機物の土粒子への吸着性状の解明、微視的観察などを行った。

(1) 界面特性

界面特性として処理土の C E C を測定した。有機物含有量との関係で示したものが図 4-20 である。有機物含有量の増加とともに処理土の界面活性が増大している。ちなみに、別に抽出した腐植酸単体の C E C の実測値は 297.1 me/100g となり著しく高活性を示すことが明らかである。

(2) 土粒子への吸着のメカニズム

有機物、特に腐植酸の土粒子への吸着特性を明らかにし、ベッド化作用を検討するものである。

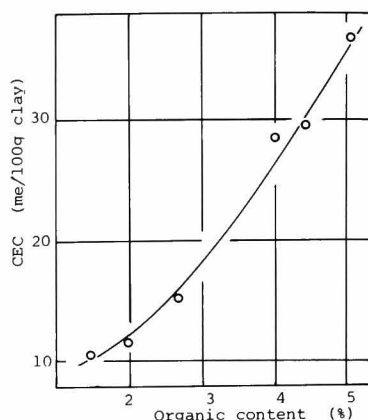


図 4-20 CEC の変化

基本的特性を把握するための単一粘土鉱物系のカオリナイトとモンモリロナイトについては、つぎのようにして有機成分処理試料を作成した。はじめに緩衝液を用いて pH 3.6, 5.4, 7.0, 9.0, 12.0 に土試料を調整する。これの 10mg に対し、4.3.1 で述べたようにして作成した精製腐植酸を 10, 20, 50, 100mg 添加し、8 時間以上振とうする。土粒子へ吸着しえない遊離腐植酸を遠心分離して除いたものを有機成分処理試料とする。

なお、吸着メカニズムの検討項目として、粘土鉱物の結晶格子層間への吸着については X 線回折を用い、物理吸着性については赤外線吸収スペクトル分析 (KBr 錠剤法による) と示差熱分析とを行った。

(i). 単一粘土鉱物系における反応

X 線回折によって粘土鉱物の d(001) 面間隔を測定し、有機成分処理土の層間の変化を求めた例を図 4-21 に示している。カオリナイトでは変化がみられないのに対し、モンモリロナイトでは酸性側で層間吸着による d(001) の増大がみられる。腐植酸の添加量の増加に伴って大きな増大が生じており、これを pH をパラメータにしてまとめると図 4-22 のようになる。酸性側で層間膨潤量が大きいのは、これは腐植酸の COOH 基、フェノール性 OH 基などの解離が酸性条件ではおきえらるから、粘土鉱物-腐植酸間の負電荷による反発がなくなり層間吸着されやすくなるためである。カオリナイトで層間吸着が生じないのは、もちろんカオリナイトの水素結合が強いためである。

赤外線吸収スペクトル分析の結果は図 4-23 ~ 4-25 に示している。図 4-23 は有機物の種

類の差によるスペクトルの変化を表わしており、図4-24、4-25はそれぞれカオリナイトとモンモリロナイトの処理土のスペクトルである。腐植酸の添加により 3400cm^{-1} 付近の結合OH基、 1600cm^{-1} 付近のCO基、 800cm^{-1} 付近の芳香族の吸収の増大が現われている。これは粘土鉱物

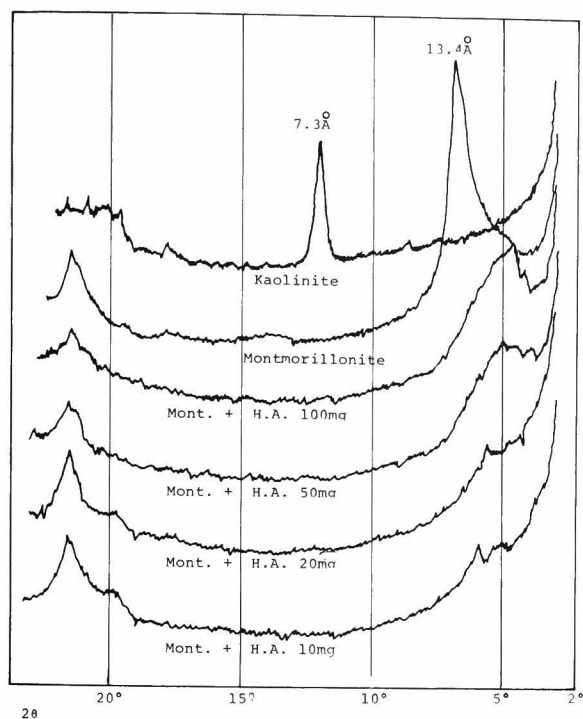


図4-21 X線回折にみられる層間隔の変化

と腐植酸のピークを重ね合せた状態のものであるが、 1600cm^{-1} 付近のC O振動によるピークが pHの増大に伴い低波数側へと移動しており、カンボン酸の塩形成によるものと考えられる。

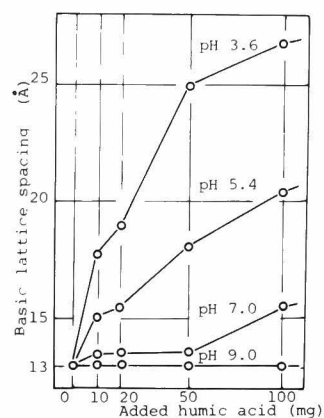


図4-22 モンモリロナイトの層間膨潤量

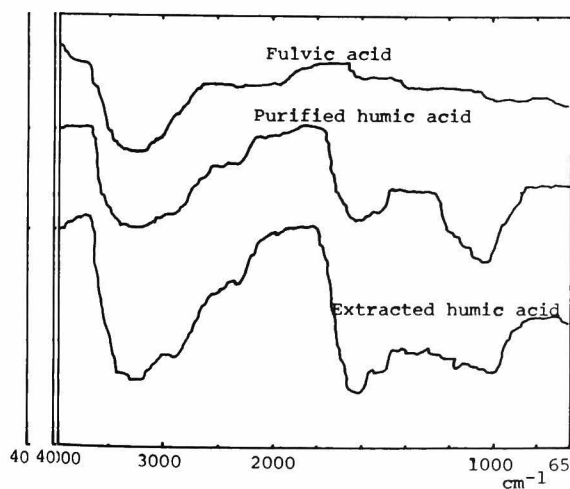


図4-23 有機物の種類による赤外線吸収スペクトル

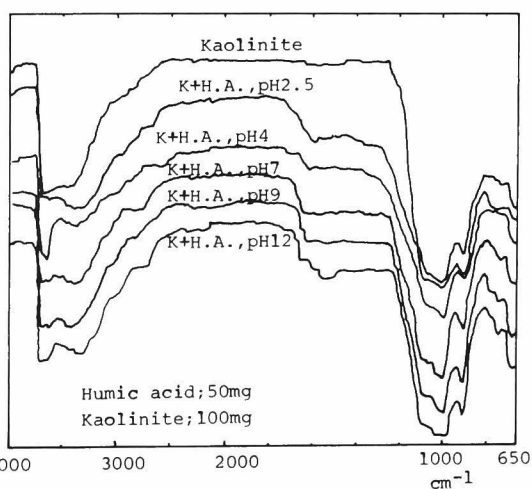


図4-24 カオリナイトの赤外線吸収スペクトル

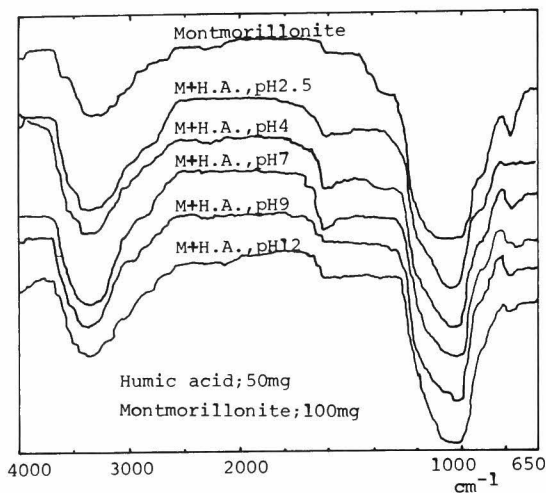


図4-25 モンモリロナイトの赤外線吸収スペクトル

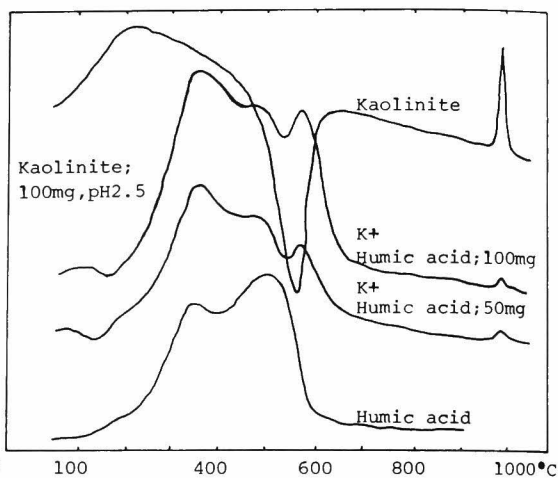


図4-26 カオリナイトの示差熱分析曲線

示差熱分析の結果は図4-26、4-27に示している。ここでも粘土鉱物と腐植酸のピークを重ね合せた状態を表わしている。

以上の結果から、モンモリロナイトの層間には腐植酸が吸着され膨潤を生じるが、カオリナイトでは層間吸着でなくて、表面吸着及び混合効果を示すのみであることがわかる。

(ii) 自然粘性土における反応

単一粘土鉱物系での知見をもとに、X線回折からモンモリロナイト群（14Åのピーク）

とカオリナイト群（7Åのピーク）とのピーク高さとピーク面積を算定し、それらの相対比を有機物含有量との関係で表わすと図4-28のようになる。カオリナイト群では有機物の吸着が生じなくて、モンモリロナイト群において層間吸着の可能性をもっている。図では有機物の増加とともにモンモリロナイト群のピーク高さ、ピーク面積ともに減少している。よって自然粘性土である南港粘土においても有機物

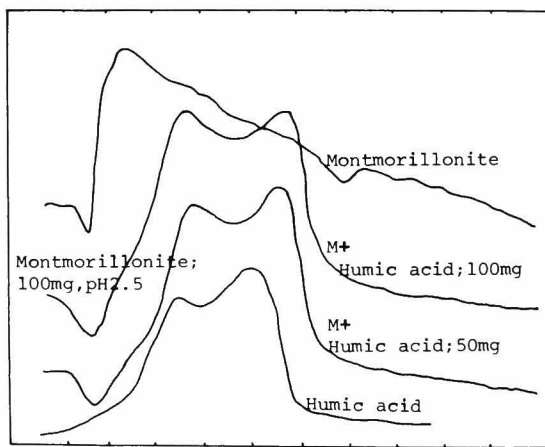


図4-27 モンモリロナイトの示差熱分析曲線

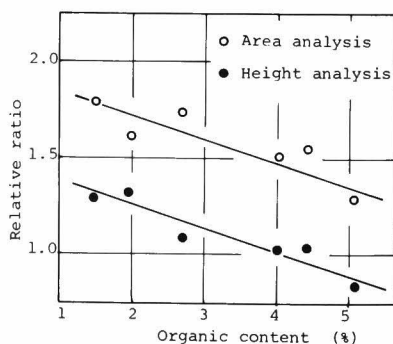


図4-28 処理土中の粘土鉱物のX線回折図における変化

はモンモリロナイト群の層間に選択吸着されることがわかる。

赤外線吸収スペクトル分析ならびに示差熱分析の結果は図4-29, 4-30 である。吸収スペクトルでは有機物の減少とともにOH, CH₂, CH₃, CO基のピークの減少がみられる。これらからも自然粘性土における有機物は、モンモリロナイト群への層間吸着以外は、主に表面吸着（一部にイオン交換反応を含むと考えられる）によっているものである。

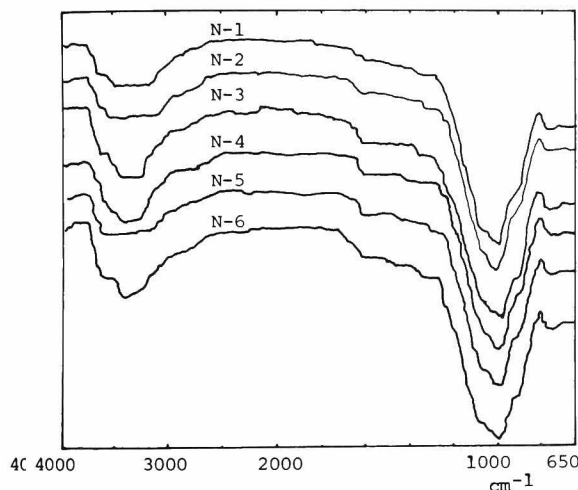


図4-29 処理土の赤外線吸収スペクトル

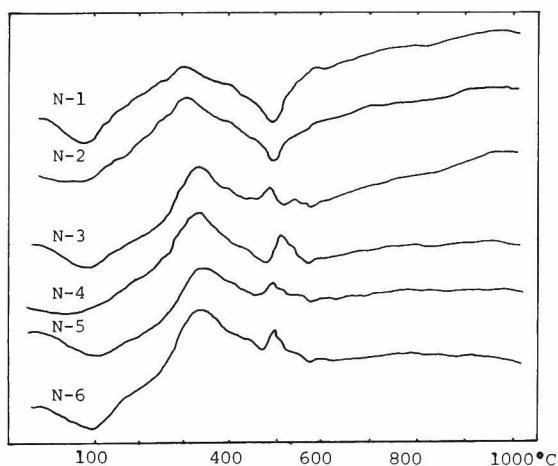


図4-30 処理土の示差熱分析曲線

(3) 微視的観察

走査型電子顕微鏡によって微視的観察を行った。添加した腐植酸については、これを空気乾燥しその表面状態ならびに破断面の形状をみたものが写真4.1～4.3である。写真4.1のように気乾表面では平滑な面がみられ、乾燥収縮によるひびわれが発生している。腐植酸の組織単位は不明である。一方、破断面の写真4.2, 4.3では組織単位らしきものの不規則な分布状態が観察される。特に写真4.2では気乾収縮の方向に異方性があったためか、植物の葉脈状の組織がみられる。これらの結果から明らかなように腐植酸の形態は定まったものでなく、環境条件の変化に伴って種々の形状をとるものである。

有機成分処理土の構造については圧密、せん断試験を行ったものを観察した。圧密時 ($p=12.8 \text{ kg/cm}^2$) の構造は写真4.4～4.7のとおりである。最大主応力面のH-断面では板状不定形粒子の平行配列が一部に観察される。これに対して、それに直交するV-断面ではベッド化を呈しているため端面の発達是不充分のようである。せん断は等体積一面せん断試験結果の供試体を観察したものが写真4.8～4.11である。ここでも第3章で示したように、ベッドの再配列によって明確なすべり面が生じていない。なお、自然粘性土中での有機成分の識別は、形状観察のみでは

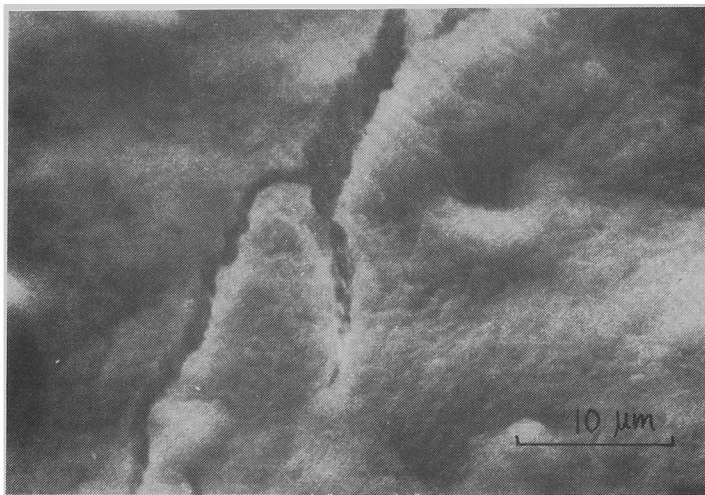


写真 4.1
気乾腐植酸表面
(乾燥収縮によるわれ目)
× 2000

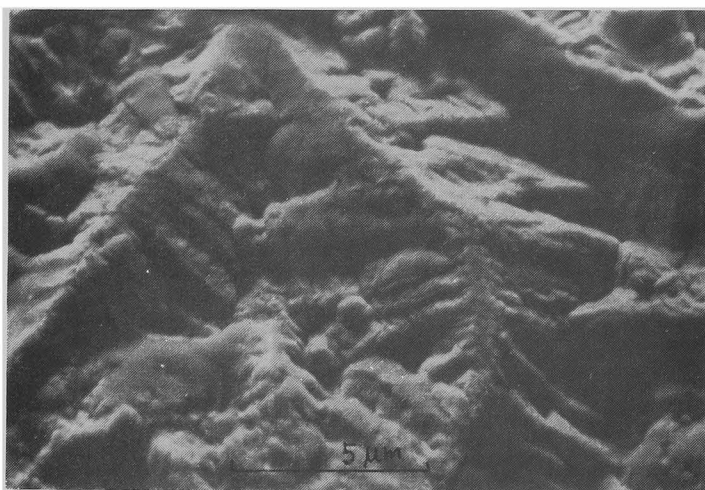


写真 4.2
気乾腐植酸破断面
(葉脈状の組織) × 5000

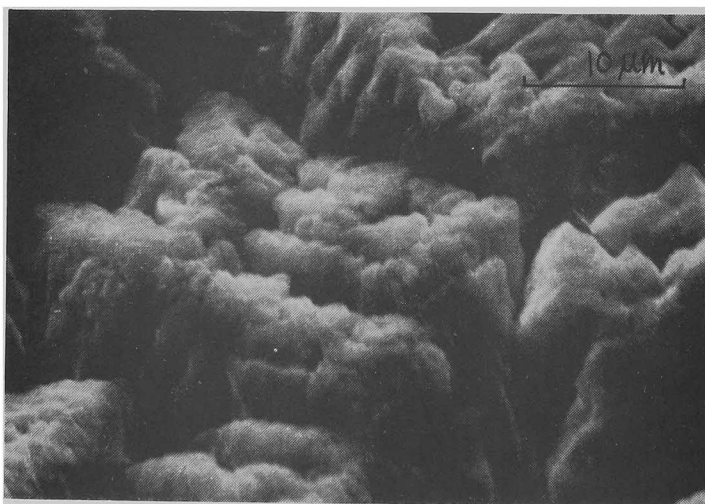


写真 4.3
気乾腐植酸破断面
(霜柱状の組織) × 2000

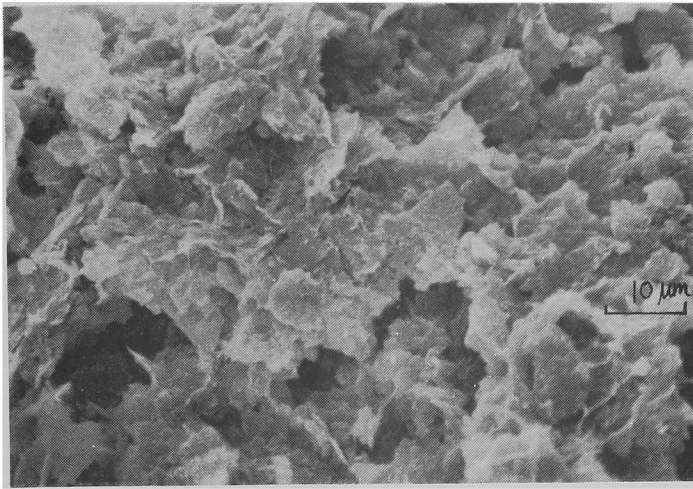


写真 4.4
有機成分処理土 N-6 の
圧密 H-断面
 $p = 12.8 \text{ kg/cm}^2 \times 1000$

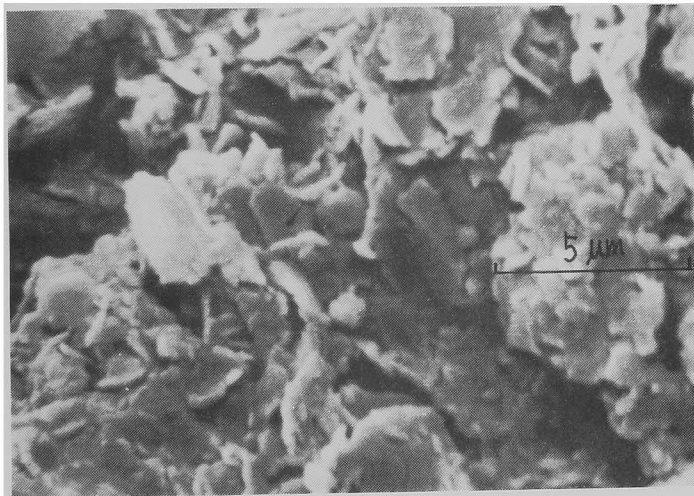


写真 4.5
有機成分処理土 N-6 の
圧密 H-断面
 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 5000$

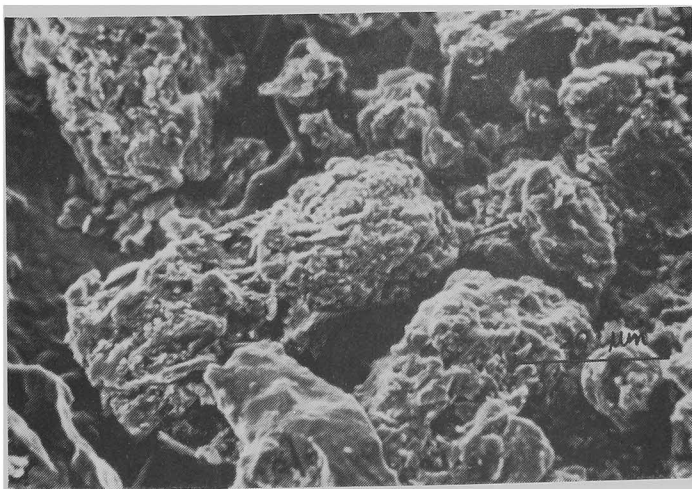


写真 4.6
有機成分処理土 N-6 の
圧密 V-断面
 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \times 1000$

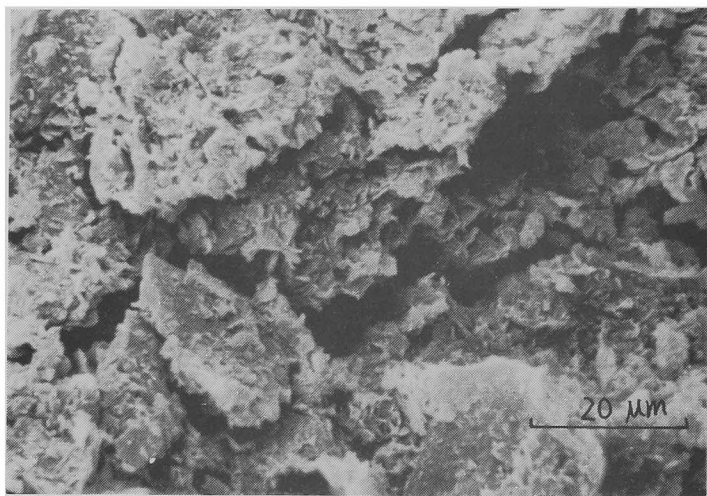


写真 4.7
有機成分処理土 N-6 の
圧密 V-断面
 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 1000$

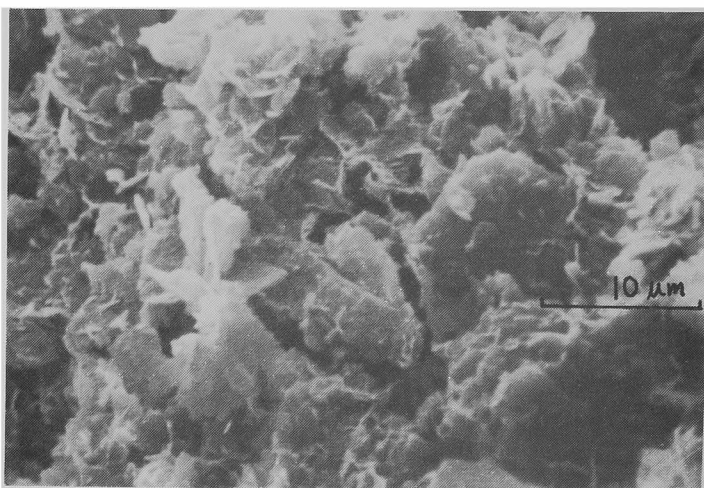


写真 4.8
有機成分処理土 N-6 の
一面せん断 H-断面
 $p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$

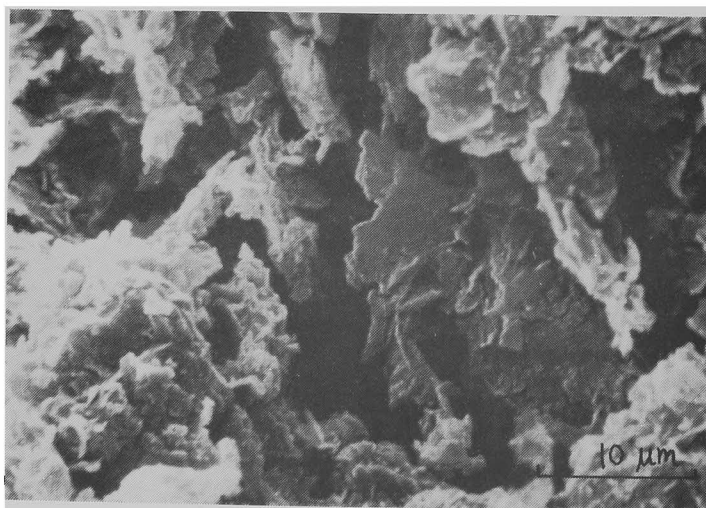


写真 4.9
有機成分処理土 N-6 の
一面せん断 V-断面
 $p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$

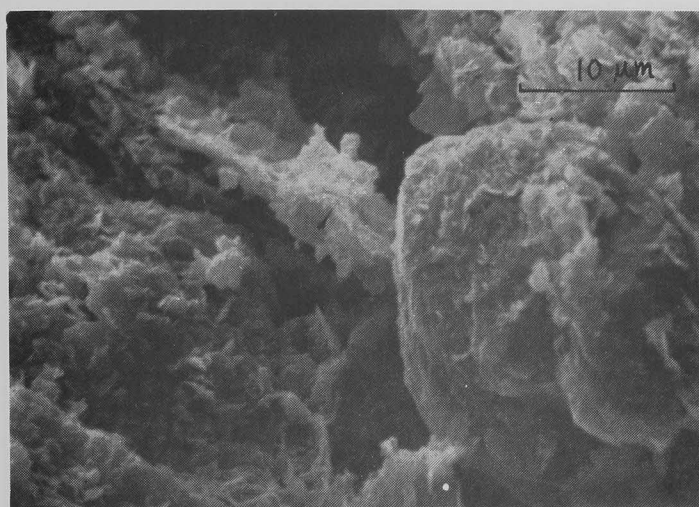


写真 4.10

有機成分処理土 N-4 の
一面せん断 H-断面

$$p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$$

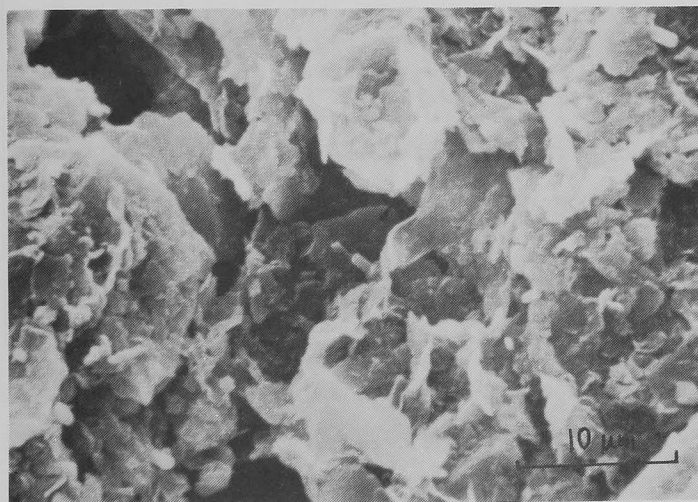


写真 4.11

有機成分処理土 N-4 の
一面せん断 V-断面

$$p_0 = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \times 2000$$

不可能であるため残念ながら行いえないものである。

4.2.4 まとめ

本節では有機成分処理土の工学的特性の変化とメカニズムについて明らかにした。えられた成果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) 土中有機物について、その活性の大きいものとして腐植をえらび、土中での存在形態を明らかにしたが、用いた南港粘土では約30%が活性な腐植である。
- (2) 有機成分処理土の工学的性質の変化として、比重、コンシステンシー、圧密、せん断諸特性を明らかにした。それらは有機物総量の差によって変化するものである。

- (3) コンシステンシー特性では、特に液性限界値を大幅に増大させる。
- (4) その結果として圧密特性でも C_c を増大させることになり、有機成分処理土の変形量は大きくなる。さらに c_0 、 k が減少するため、有機物は圧密遅延の作用を示すものである。
- (5) 2次圧密量を $d\epsilon/d\log t$ で示し、有機物による影響項と吸着水をも含めた粘性土の時間効果項とを分離して表わした。
- (6) せん断強度は有機成分処理によって増大し、強度増加率 C_u/p の増大をえている。
- (7) 工学的特性の変化のメカニズムとして、界面特性を塩基置換容量の差で表わした。
- (8) さらに有機物の土粒子への吸着特性をX線回折、赤外線吸収スペクトル分析、示差熱分析によって検討し、試料土中のモンモリロナイトへの層間吸着、他の粘土鉱物では表面への物理吸着を明らかにした。
- (9) 微視的考察として、添加した腐植酸の出現状況ならびに有機成分処理土のペッド状態を観察した。

以上のように有機成分処理土は、その強度特性において増大がみこまれるものである。しかしながら、腐植酸を添加することは、實際上その入手が困難であり、また添加すること自体を目的とする訳ではない。そこで、このような結果を次節の微生物処理土に応用して微生物の人為的管理によって生化学的に土質安定処理をめざすものである。

4.3 微生物による生化学的安定処理土の工学的性質とその改良のメカニズム²²⁾

4.3.1 試料調整法

さきに述べたように、微生物の生育のためには栄養源と生育環境との管理が必須のものである。すなわち、添加栄養源の内容と環境条件とに応じて、優先的に生育する微生物の種類とが定まるものである。よって、土の工学的性質に影響を及ぼしうる微生物を選択するために11種類の菌を用いて、以下のような予備的検討がなされ、それらの結果から試料調整法を決定した。

(1) 本研究に用いる微生物の選択

試料土は大阪南港粘土を気乾し、 $420\ \mu m$ のフルイ通過分とした。検討した11種類の微生物は表4-4に示したとおりである。表中で土懸濁液とあるのは京都大学土木工学教室構内の表土を水中に分散させたもので、土1g中に約 1.2×10^7 の細菌が含まれている。試料No.4~9で使用した接種菌は菌類であり、No.10,11は放線菌、No.12は細菌である。これらは傾斜培養で4日間培養され、その後粘土試料中に加えられた。また用いた微生物栄養源はしよ糖0.2%、 $(NH_4)_2SO_4$ 0.1%、 K_2HPO_4 0.1%である。南港粘土の液性限界付近(80%)の含水比で添加混合した後に、蓋つきのプラスチック容器中で30℃の温度で培養する。微生物の増殖にともなって発生するガスを追い出すために、1日1回上蓋が開けられた。4週間培養ののち、気乾して、強度試験を

表 4-4 微生物の選択のための実験条件とその結果

Sample Number	CONTENTS	Fall cone penetrating amount (after 1 week air-dried)	
		water content (%)	h (mm)
1	Osaka-Nanko Clay < 420 μm (500g) + tape water (300cc)	19.6	0.82
2	No. 1 + microbial nutrients + "soil suspension"	16.7	<u>0.16</u>
3	No. 2 + reduced iron powder (5g)	20.1	0.44
4	No. 1 + microbial nutrients + <u>MUCOR ROUXIANUS</u>	18.5	0.48
5	No. 1 + microbial nutrients + <u>RHYZOPUS ORYZAE</u>	11.0	0.60
6	No. 1 + microbial nutrients + <u>ASPERGILLUS ORYZAE</u>	18.1	<u>0.42</u>
7	No. 1 + microbial nutrients + <u>ASPERGILLUS NIGER</u>	17.3	0.42
8	No. 1 + microbial nutrients + <u>PENICILLIUM CHRYSOGENUM</u>	8.6	0.46
9	No. 1 + microbial nutrients + <u>NEUROSPORA CRASSA</u>	14.7	0.52
10	No. 1 + microbial nutrients + <u>SCABIES</u>	11.3	0.61
11	No. 1 + microbial nutrients + <u>STREPTOMYCES</u>	13.9	0.52
12	No. 1 + microbial nutrients + <u>BACILLUS CEREUS</u>	18.8	<u>0.40</u>

行い、適当な微生物種の決定のため検討した。強度試験としてはコーン貫入試験を用いたが、その結果は表 4-4 にあわせて示している。未処理土に比較して処理土はすべて大きい貫入抵抗がみられる。これらのうちでも土懸濁液を接種した試料 No.2 が最も大きい抵抗値を示している。よって以下の本実験用としては、No. 2、No. 6 の *Aspergillus Oryzae* (放線菌) と No.12 の *Bacillus Cereus* (細菌) の 3 つを選択した。ところで土懸濁液を接種した場合に、強度的にみて最大の効果を示しているが、この接種菌は一般の土壌微生物そのものである。よって今後の検討を経て、このような効果が確立されれば、特定の微生物を土中に導入する必然性はないことになり、土質安定処理上きわめて好都合になる。

(2) 微生物処理土の調整法

主として大阪南港粘土を用いたが、対照として単一粘土鉱物からなるカオリナイト (クラウンクレー) とモンモリロナイト (ベンナイト) とを追加している。

試料の条件は表 4-5 にまとめたとおりである。添加量は土粒子乾燥重量に対する重量百分率

で表現している。カオリナイトとモンモリロナイトでは下水活性汚泥（1 ccあたり 3.7×10^7 の細菌を含む）をも用いたが、これは土懸濁液以上に多くの一般微生物種を含んでおり、微生物

表 4-5 微生物処理土の試料条件

Sample No.	Contents	Conditions
O-1	Osaka Nanko Clay, wet (water content 79 %)	incubated
O-2	O-1 + "soil suspension" (garden soil) as inoculum + K_2HPO_4 (0.1 %) + NH_4Cl (0.1 %) + sucrose (0.1 %)	at 25 °C
O-3	O-1 + "soil suspension" (ricefield soil) + K_2HPO_4 (0.1 %) + $(NH_4)_2SO_4$ (0.1 %) + sucrose (0.2 %)	pre-con- solidated
O-4	O-2 + sucrose (0.2 %)	0.015
O-5	O-2 + sucrose (0.4 %)	kg/cm ²
O-6	O-2 + sucrose (1.0 %)	
K-1	Kaolinite (crown clay), water content 120 %	incubated
K-2	K-2 + <u>ACTIVATED SLUDGE</u> as inoculum + K_2HPO_4 (0.1 %) + $MgSO_4$ (0.05 %) + NH_4Cl (0.05 %) + + Na_2NO_3 (0.05 %) + $FeSO_4$ (0.001 %) + sucrose (0.2 %)	at 28 °C
K-3	K-1 + <u>BACILLUS CEREUS</u> as inoculum + the same microbial nutrients in K-2	non- pre-con- solidated
K-4	K-1 + <u>ASPERGILLUS ORYZAE</u> as inoculum + the same microbial nutrients in K-2	with
B-1	Bentonite, water content 300 %	cover
B-2	B-1 + the same inoculum and microbial nutrients in K-2	opened
B-3	B-1 + the same inoculum and microbial nutrients in K-3	everyday
B-4	B-1 + the same inoculum and microbial nutrients in K-4	

作用を強調し
うと予想さ
れたからであ
る。

微生物の細
胞構造の形成
に役立つ最も
重要な物質は
炭素であるが
添加するしょ
糖の量の増大
に伴って微生
物の増殖が促

進される。図4-31は試
料中に存在する菌の数
(生菌数)を希釈平板法
によって求めた結果であ
る。当然予想されたよう
に、土中に存在する生菌
細胞数は炭水化物の添加
量がふえるにつれて増加
している。その数は培養
1～2週間でピークに達
しそれ以後は徐々に減少
するものである。

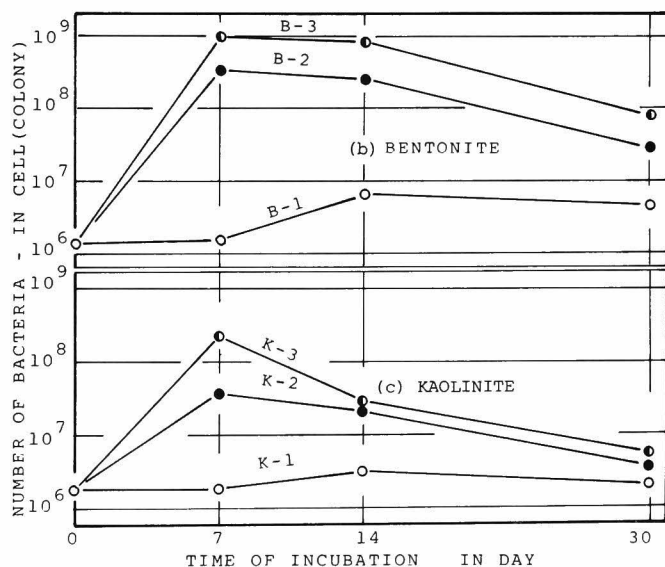
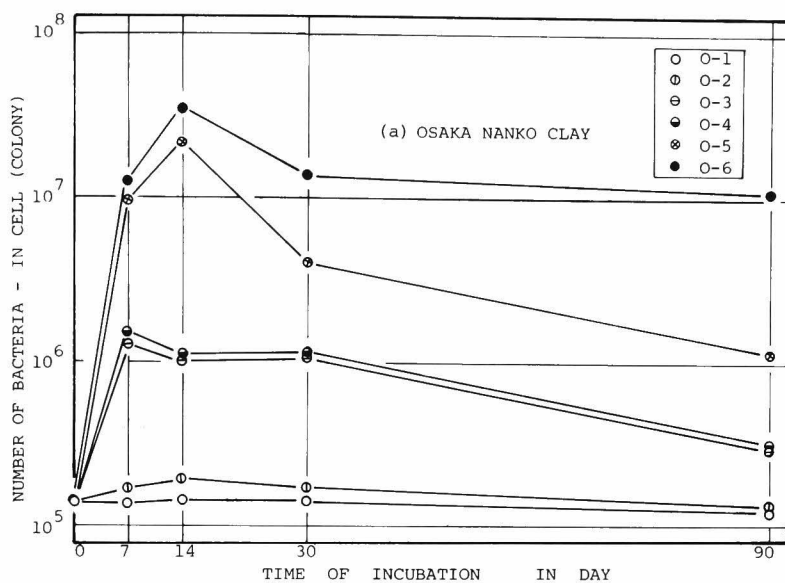


図4-31 微生物処理土中の生菌数の変化

4.3.2 微生物処理土の工学的性質

微生物処理を土質安定へ展開するための基礎的情報として、その工学的特性の改良程度の把握が最も重要である。そこで本項ではせん断強度、圧密、締固めなどの諸特性の検討を行った。

なお、実験に際しては試料をできるだけ乱さないように留意して行っている。

(1) 強度特性

本研究では処理土内における微生物の増殖によって、土粒子にペッド化が生じ、系内の摩擦力成

分、粘着力成分が変化することによる処理土の強化増加を期待するものである。

強度特性は1軸圧縮試験とコーン貫入試験とによって測定された。1軸圧縮用供試体は、所定の期間培養された後、直径3 cmのシンウォールサンプラーで試料容器からボーリングして作成した。長さは6 cmとした。その後、室温で空気乾燥させ、漸次供試体中の含水比を減少させて試験を行った。なお、培養期間の短い試料はシンウォールサンプラーで不攪乱試料を採取できないため、コーン貫入試験によった。

図4-32は、南港粘土の2週間培養試

料の1軸圧縮強度を示している。図から、 q_u が未処理試料O-1からO-2、O-3へと次第に増大し、O-4で最大値に達した後O-5、O-6で減少していることがわかる。O-6はばらつきが大きい、これは添加した炭化水素が過剰になって試料中の微生物の増殖が著しく、そのため生じる2酸化炭素ガスによって多くの空隙が存在することに起因するものである。試料O-3とO-4は、同一の炭水化物量で、ほぼ同じ生菌数であるが、O-3のせん断強度はO-4より明らかに小さくなっている。このことは2つの試料中で増殖された微生物の種類が異なるということによってしか説明されない。O-3での主要微生物は、添加した栄養源や発生した硫化水素ガスから硫酸還元菌であると予想され、この微生物の増殖では強度増加が相対的に小さいものとみなされる。

さらに、他と比較して最も高い強度をえているO-4試料について、その経時変化を表わしている図4-33は、この強度改良が時間の経過に伴って増加するこ

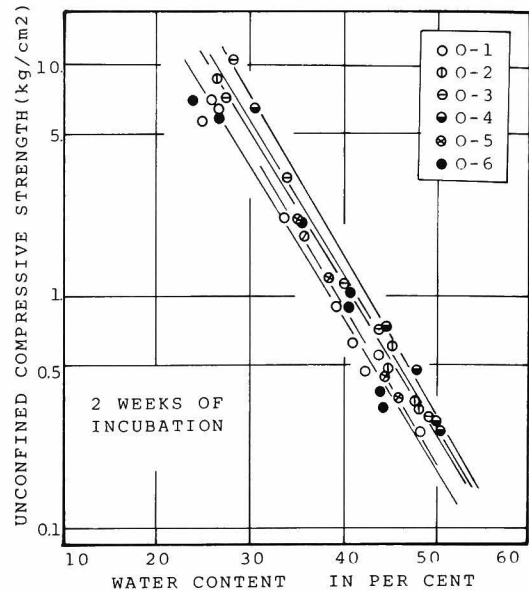


図4-32 大阪南港粘土試料の q_u の変化(2週間培養)

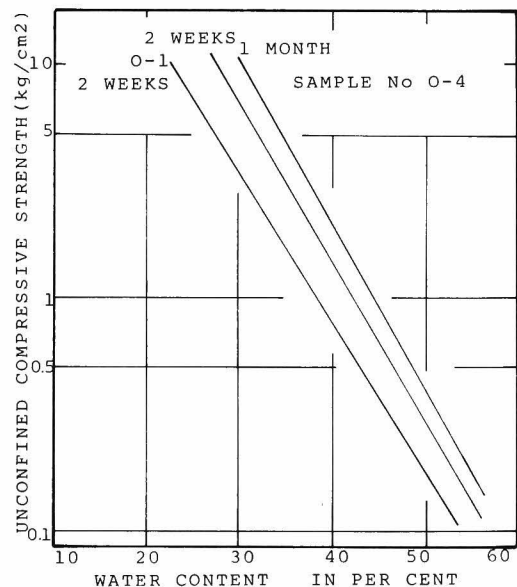


図4-33 O-4試料の q_u の変化

とを示している。南港粘土試料におけるコーン貫入試験の結果を図4-34に示しているが、これらは q_u の結果とはほぼ同様である。

カオリナイトおよびモンモリロナイト試料の結果は図4-35、4-36である。これらは南港粘土試料と類似の結果を与えている。ただし、モンモリロナイトの場合、含水比の低下に従って強度が急増し、図中に折れ点が生じている。この点の意味については今後の検討を残しているが、全処理試料において未処理土より高い貫入抵抗を得ている。時間の経過によって生菌数が減少するにもかかわらず、微生物処理土の強度が増大するという事実は、この強度改良が生菌数よりはむしろ試料内に存続する微生物生成物質の結合効果に基づくことを示唆している。

(2) 圧密特性

側方拘束の K_0 圧密を1時間の急速段階荷で行った。表4-6は大阪南港粘土の種々の期間培養された土の圧縮指数 C_c を表わしている。処理土の C_c は大きくなっており、この変化は微生物によって土粒子のペッド化が生じてても、その圧縮性は高いものであることを示している。一方、圧密係数 c_p は処理土の方が未処理土より大きくなっており、(図4-37参照)、微生物処理土の圧密速度が大

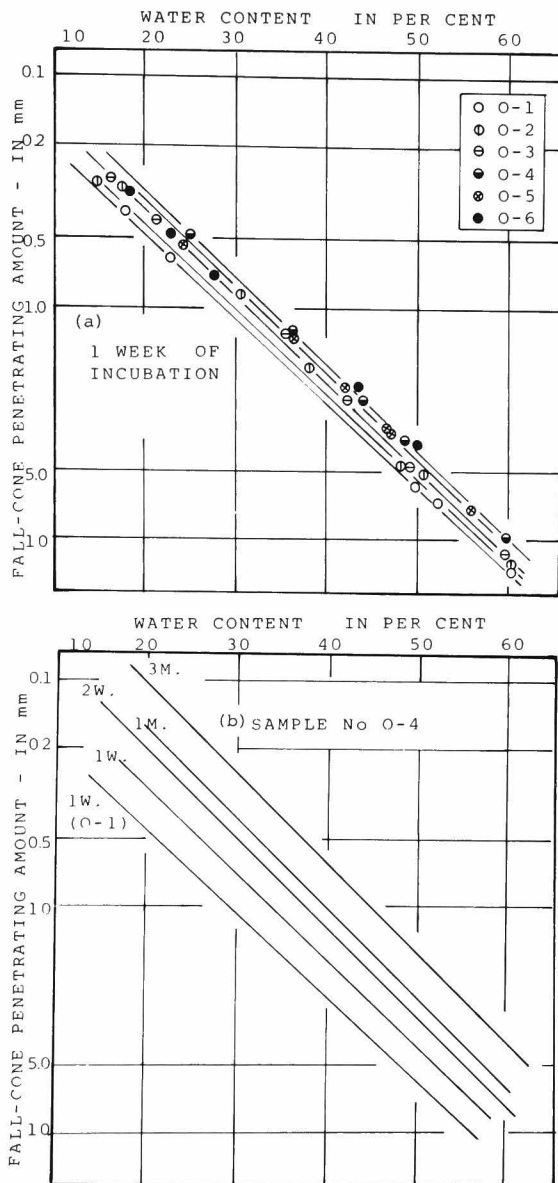


図4-34 大阪南港粘土試料のコーン貫入量の変化

表4-6 微生物処理土の圧縮指数の変化

incubating time Sample No.	1week	2weeks	1month	3months
O-1	0.41	0.39	0.42	0.42
O-2	0.37	0.43	0.42	0.46
O-3	0.40	0.49	0.49	0.57
O-4	0.40	0.48	0.51	0.53
O-5	0.46	0.44	0.48	0.53
O-6	0.49	0.47	0.49	0.46

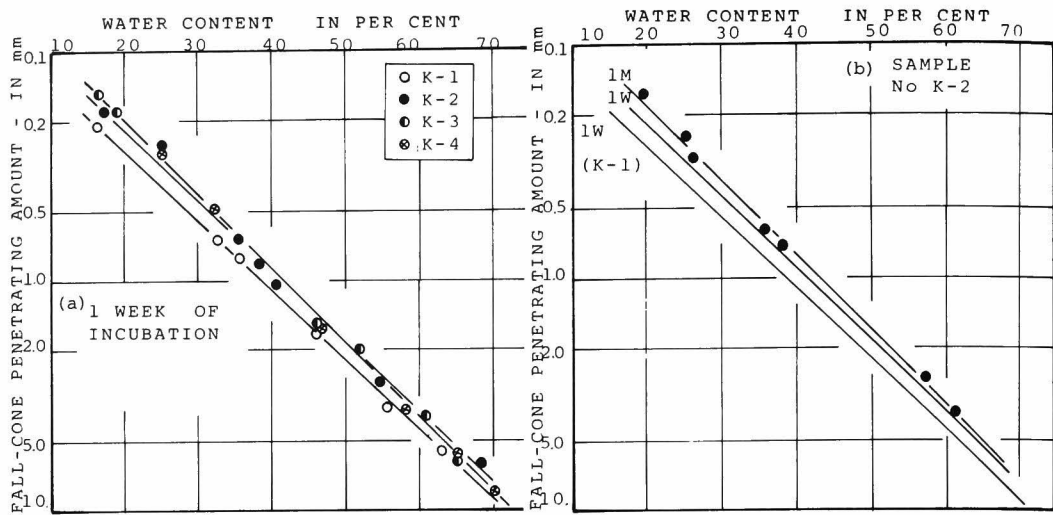


図4-35 カオリナイト試料のコーン貫入量の変化

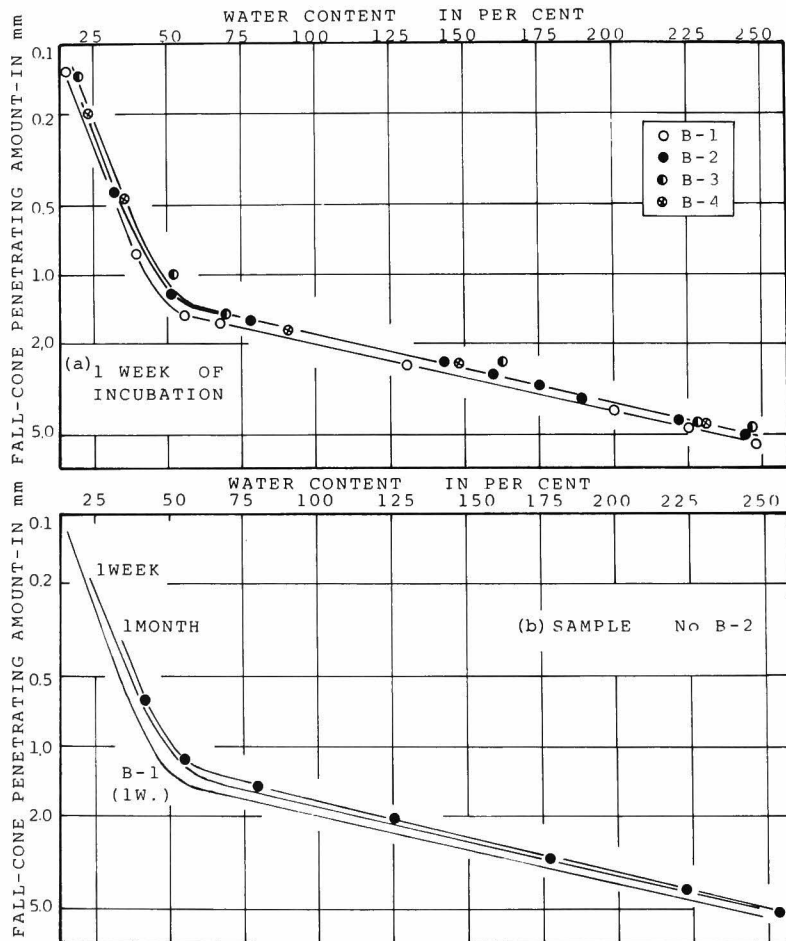


図4-36 モンモリロナイト試料のコーン貫入量の変化

なることを示している。そして体積圧縮係数 m_v は全試料でほとんど差がみられない。図4-38は透水係数 k の変化を示しているが、微生物処理土の k が未処理土の k より約1オーダー大きくなることを示している。

4.2.2の有機成分処理土の圧密特性では、逆に c_u が有機物含有量の大きなほど小さくなって圧密遅延効果を示していたが、微生物によるペッド化作用が有機物の保水性以上に土中の透水性を高めるためであると考えられる。

(3) 締固め特性

ハーバード型ミニチュアモールドを用いた締固め試験を行った。用いた試料は1ヶ月間培養された処理土を空気乾燥し、 $420\ \mu\text{m}$ フルイを通過したものである。南港粘土の結果は図4-39のとおりである。試料O-4の締固め曲線は未処理のO-1よりも右方に移動している。最大乾燥密度 $\gamma_{d\text{max}}$ は処理によってもほとんど変化していない。図の上部は締固めた供試体の q_u と w との関係を示しているが、全処理土試料の q_u は未処理土よりも高くえられている。カオリナイトやモンモリロナイトの場合も同様の結果が図4-40、4-41のようにえられており、微生物増殖による結合物質によって軟弱粘土が材料的に良質化されたことを意味している。

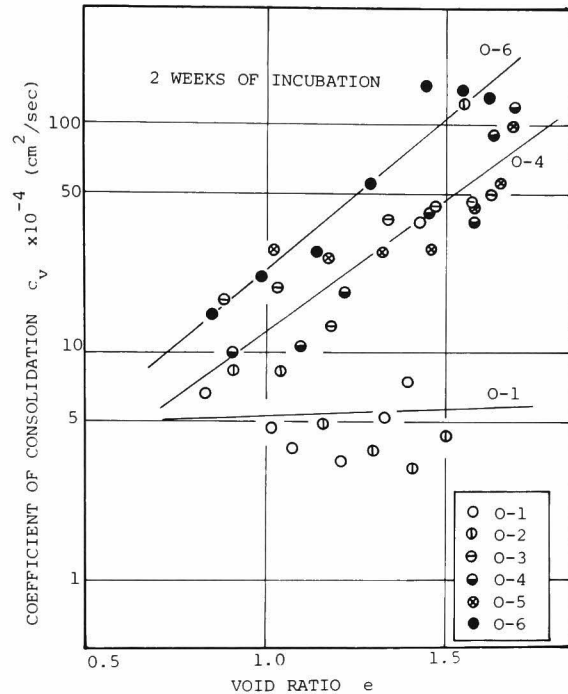


図4-37 圧密係数の変化

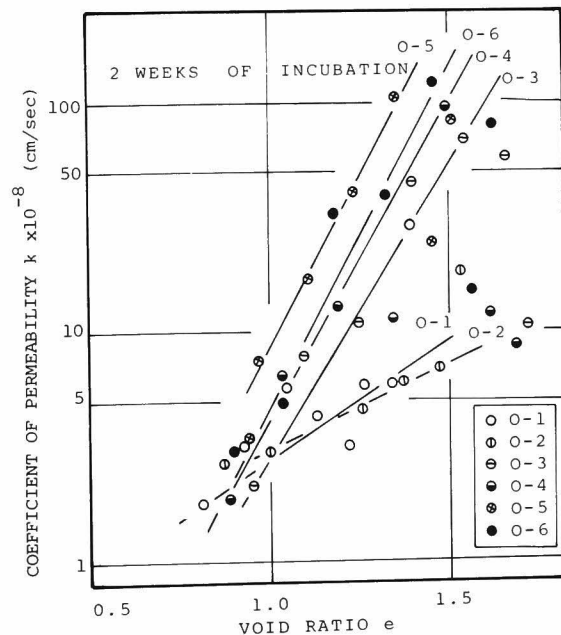


図4-38 透水係数の変化

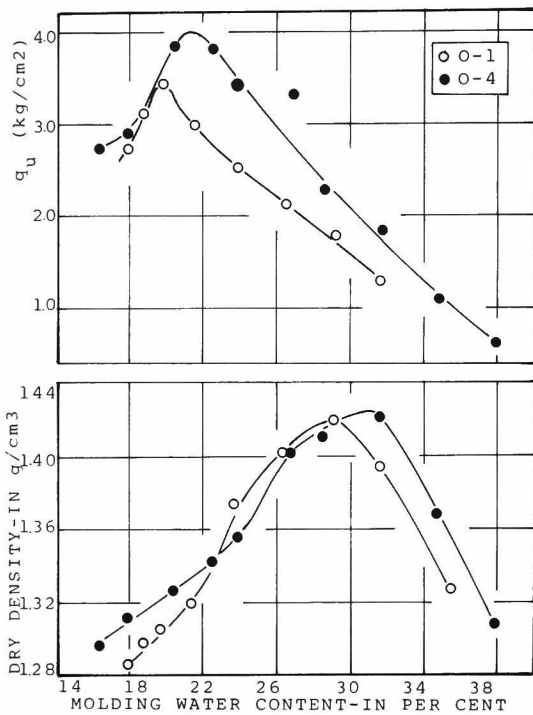


図4-39 大阪南港粘土試料の締固め曲線と q_u

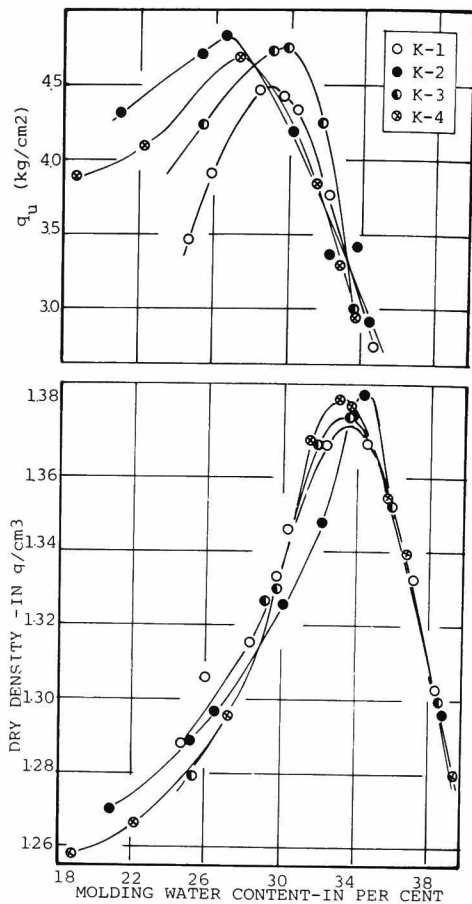


図4-40 カオリナイト試料の
締固め曲線と q_u

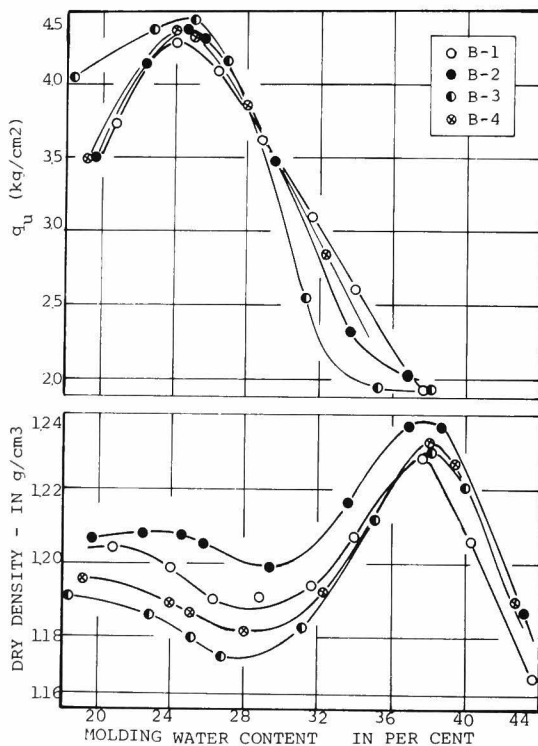


図4-41 モンモロロナイト試料の締固め曲線と q_u

(4) コンシステンシー特性

図4-42は処理土のコンシステンシーの変化を示している。塑性限界はほとんど変わらないが液性限界では養生によって大きく減少している。添加直後の減少は栄養源中のカチオンによる影響であり、養生日数の増加に伴って微生物の増殖の影響が出てきている。しかし1~2週間以降、変化はあまり生じない。このことは前に述べたように微生物の生菌数にはあまり関係なく、

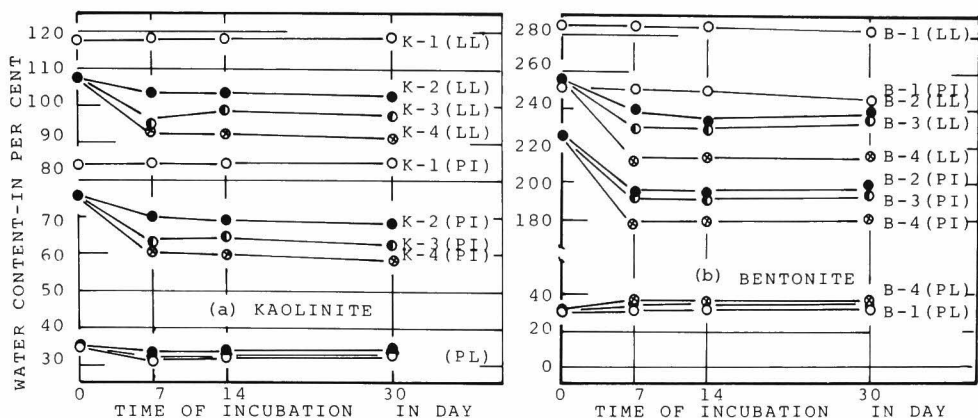


図4-42 コンシステンシー特性

菌の生成物質等による影響が大きいことを意味している。

以上のごとく、微生物処理は土の工学的性質を大きく改良しうるものであり、用いた接種菌のなかでも土懸濁液（一般微生物種から成る）を用いたものに効果が大となることを示している。このような結果は微生物処理の応用面において、きわめて好ましいものである。すなわち、特定の微生物種でなければ土質安定に効果がみられないとすると、その微生物種の生育のための管理を实地盤で行うことが必要となる。しかしながら、これは事実上ほとんど不可能である。これに対して、一般の微生物種で効果がみられるということは、栄養源の添加さえしておけば、あとは接種時期（初夏から夏の温度条件）のみで解決することができる。さらに、この接種時期についても、生育の速度が少し落ちるのを許せば、一年を通じて可能である。

4.3.3 微生物処理土の改良のメカニズム

農業土壌学の分野では、さきに述べたように土粒子が微生物によってペッド化され安定されうるという多くの報告がみられる。それゆえ、前項で明らかにした微生物処理土でえられる物性の改良効果が、微生物活動による結合作用、ペッド化と関係することは言うまでもないであろう。しかしながら、これまでの研究では単にペッド化するという現象の報告のみで、その粒度分布などの物理的な性状や層間への吸着現象などについてはほとんどみられない。よって、ここでは微生物による土粒子のペッド化のメカニズムとして、まず生じる粒径加積曲線の変化を明らかにし、微生物増殖での生成物質による吸着現象、物理的連結および接着作用などに関する検討を行っている。

(1) 粒度分析

ペッド化傾向を最も端的に表現するものは粒度分析による粒径加積曲線である。しかしながら JISA1204 などに記された手法は、土を完全に分散させて行うものである。ここではペッド化した粒径すなわちペッド径分布の測定が必要である。第3章で述べた走査型電子顕微鏡法は粒径がメ

ゾペッドの範囲までである。ここでは砂分をも含めて実施するために、JISA1204法を一部修正した比重計法によって測定した。すなわち試料 50 g を蒸留水にて 48 時間保持し、これで壊れずに残ったペッドを測定粒径とした。分散剤としてはピロリン酸ナトリウム飽和液 10 cc を用いた。以上の手法からわかるように、これは相対的な粒径分布を与えるものである。

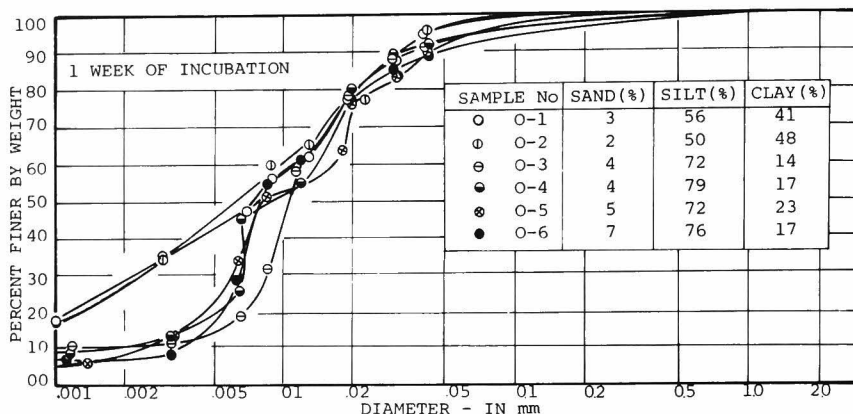


図 4-43 大阪南港粘土試料の粒度分布（1 週間培養）

図 4-43 は南港粘土の結果を示している。1 週間の養生によって、粒径曲線が下方へシフトしており、粗粒子の方向へ大きく変化したことを表わしている。図中の表は未処理試料と比べて、処理試料中の粘土分の含有パーセントの減少とシルト・砂分の含有パーセントの増大とを示している。このことは、粘土分である細粒子がシルトや砂分などのより大きいペッド構造に凝集されたことを説明している。試料 O-4（せん断強度において最も改良効果のみられた試料）の養生期間の差による粒度分布の変化が図 4-44 である。この図によれば、全処理土の曲線が細粒子域にて未処理曲線より右下方に移動（粗粒子化）していることが明らかである。ところで、時間の経過による処理曲線の変化はあまり明確でない。このことは土粒子の凝集過程において粒子の結合

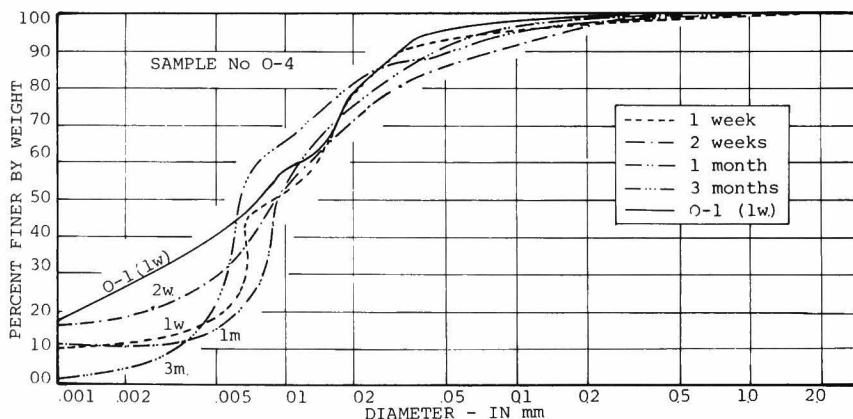


図 4-44 O-4 試料の粒度分布

物質の形態や量が変化し、その結果、ベッド化されたものが一部破壊されたり、再び促進されたりすることによるものと予想される。

図4-45, 4-46 は活性汚泥, *Bacillus Cereus*, *Aspergillus Oryzae* を添加し、それぞれ養生期間に差を与えたカオリナイトおよびベントナイト試料の粒度分布を示している。これらにおいても南港粘土の結果と同じように、全処理土の曲線が細粒子域でベッド化が進み、未処理土よりも右下方に変化していることが明白である。

(2) 微生物の生成物質の土粒子への吸着

粘土粒子への生成物質の吸着メカニズムの解明のために、微生物の生成物質を採取して、これを粘土中に添加することによる影響を検討した。生成物質としては種々予想されるが、代表として細菌 (*Bacillus Cereus*) によるものを用いた。試料の作成方法はつぎのとおりである。

(i) 試料作成の方法

振とう液体培地 (グルコース 2.0 %, ペプトン 0.5 %, 酵母エキス 0.5 %, 食塩 0.5 %, pH 7.0) の中で *Bacillus Cereus* を 1 週間純粋培養し、その後、遠心分離によって細胞を除去する。残りの培地を 1/2 に薄めたものを添加生成物質とする。これは 1 cc 中に 10 mg のグルコースを添加したものと同等の炭素量である。

粘土試料としては 2 μm 以下の南港粘土とカオリナイト、モンモリロナイトである。

添加の方法は、まず最初に 100 mg の土を試験管に採取し、1 cc の蒸留水に浸潤させる。これに 5 cc の緩衝液を加え pH 調整を行う。それから 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 cc/100mg 土の生成物質を添加する。最後に全体が 8 cc になるように蒸留水を加える。完全に混合し、菌相

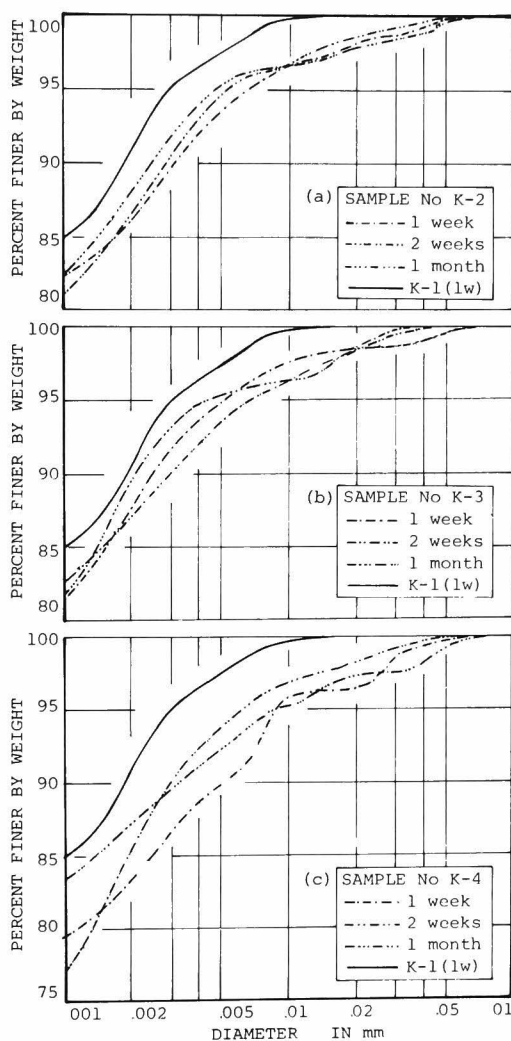


図4-45 カオリナイト試料の粒度分布

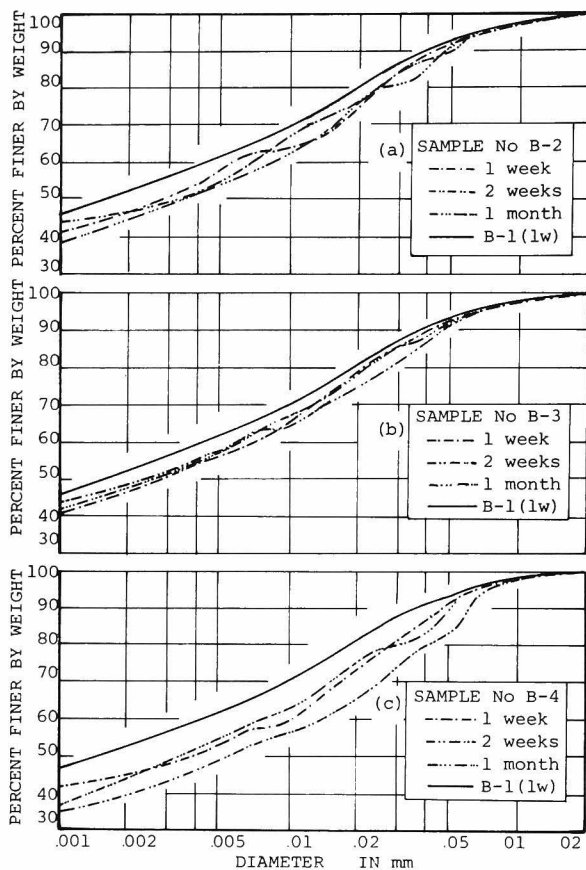


図 4-46 モンモリロナイト試料の粒度分布

$m \mu m$ 波長で光学的密度を測定し、別に同じ条件で作成しておいた検量線と比較することによって残留物質量を決定する。添加した量との差が土粒子に吸着した生成物質量である。

(ii) 吸 着 量

添加した微生物の生成物質量と粘土に吸着された量との関係は図4-47のとおりである。低活性粘土であるカオリナイトよりも、高活性粘土であるモンモリロナイトに高い吸着量がえられている。そして南港粘土ではこれら2つの中間値をえている。一般に吸着性状は、添加量の少ないところで急激に上昇し、その後、吸着が飽和に達して水平になっている。また pH が低

はあまり変化させないで、かつ安定な吸着をえるために、 $5^{\circ}C$ に保持した恒温振とう機中に3日間放置する。その後、遠心分離して、沈殿物をX線回折分析用試料とし、上澄液を吸着量試験に供する。上澄液中の菌の生成物質の量は、光電比色計の540

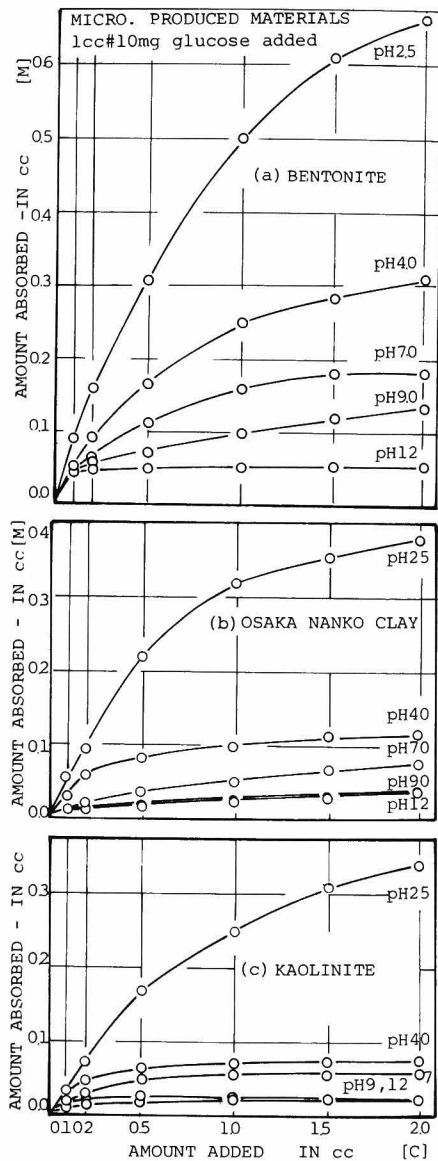


図 4-47 生成物質の吸着量曲線

いほど吸着が大きいかを示している。これは pH 値が高くなれば、生成物質の全電荷が減少し、相対的に負電荷となって土粒子と反発しあうことによるものである。

さらに、モンモリロナイトではグルコースの吸着量も測定している。結果は図4-48のとおりである。1cc 溶液中に 100 mg のグルコースという10倍の濃度での吸着を検討したものであるが、グルコースと

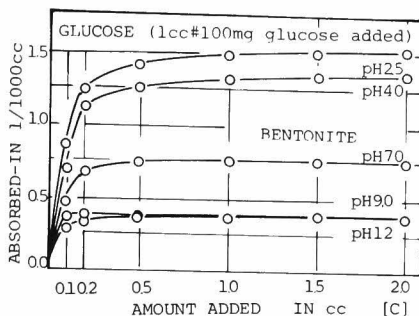


図4-48 グルコースの吸着量曲線

同等の菌の生成物質の吸着量と比べて約 1/500 の吸着量しかなく、土粒子中への微生物の生成物質の吸着によってこそベッド化が生じるものといえる。

(iii) 層間への吸着

モンモリロナイトでの高い吸着量は、粘土鉱物の構造的な相異を考慮すると、一部は鉱物の結晶層間への吸着が予想される。このことはX線回折分析による図4-49によって明らかである。モンモリロナイトの層間隔 $d(001)$ と菌の生成物質の吸着量との関係を示している。図は吸着量が高い程層間がより膨潤することを表わしている。生成物質は高分子であるため、吸着量の多寡に従ってその一部がモンモリロナイトの結晶層間に侵入して、 $d(001)$ を徐々に拡大させるものと考えられる。また南港粘土中のモンモリロナイトピークの層間膨潤もまた同様の傾向を示している。

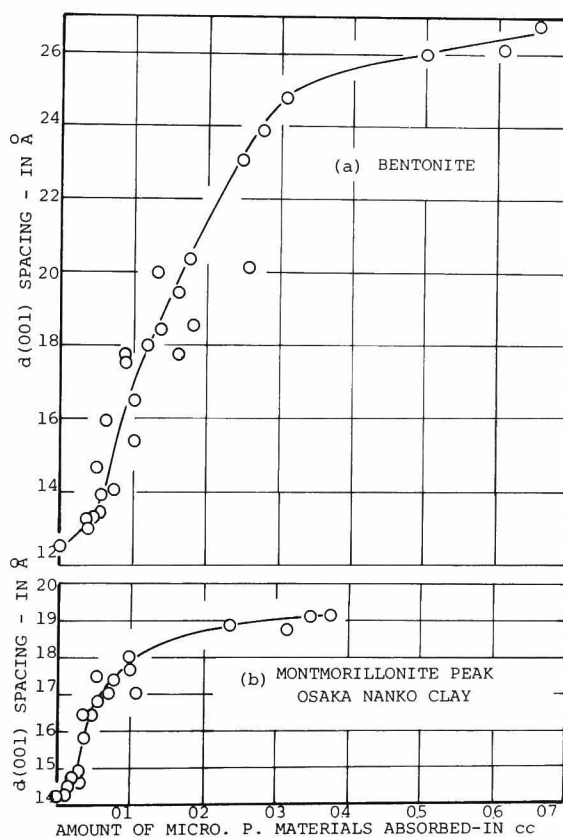


図4-49 モンモリロナイトの層間への吸着

(3) 微視的観察

微生物によって生じる土粒子のベッド化を明らかにするために、光学顕微鏡によって微視的観察を行った。

土試料の懸濁液をスライドガラス上に滴下し、*Aspergillus Oryzae*を添加して培養を行う。30℃で7日間湿潤養生した後、光学顕微鏡で観察を行った。写真4.12～4.15は結果の例である。一般に微生物による土のベッド中には、菌糸網が存在することが明らかである。ベッド構造は微生物の生成物質でおおわれ、繊維のような菌糸（線状ないしは糸状）によって結合されている。未処理試料を示す写真4.12には粒子のベッドの形跡がみられない。

また別に、一連の顕微鏡スライドガラスを7日間の養生後、気乾状態にして1ヶ月放置し、付着していない土粒子を水洗したものが写真4.16～4.18である。1ヶ月の気乾後でもやはり菌糸網で連結されているのが観察される。

多くの場合、微生物によるベッド化は、分泌された生成物質による物理吸着が、菌糸による連結作用によるものかの識別が難しいが、(2)の結果ともあわせて、この両者がベッド化をもたらしているものと結論することができる。

4.3.4 ま と め

ここでは軟弱粘土の工学的性質に及ぼす微生物の影響を取り扱い、生化学的な手段による土質安定工法への展開の基礎資料を得べく検討を行った。微生物の栄養源と一般微生物から成る接種菌とを添加することによって、微生物の生育が助長され、それに伴って土の工学的特性も改良されうることが明らかとなった。えられた成果を整理するとつぎのようになる。

(1) 予備的な実験において、土性の改良効果を期待しうるものとして、土壤懸濁液という一般微生物、ならびに*Bacillus Cereus*、*Aspergillus Oryzae*を選出することができた。

(2) 土中における微生物の増殖過程は1～2週間でピークを示すものであり、その後漸減している。

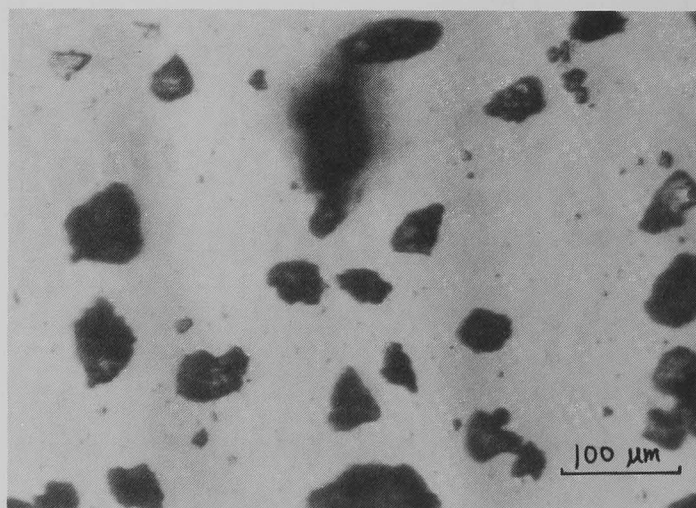


写真 4.12
微生物未処理土の分散状態（大阪南港粘土）
×150

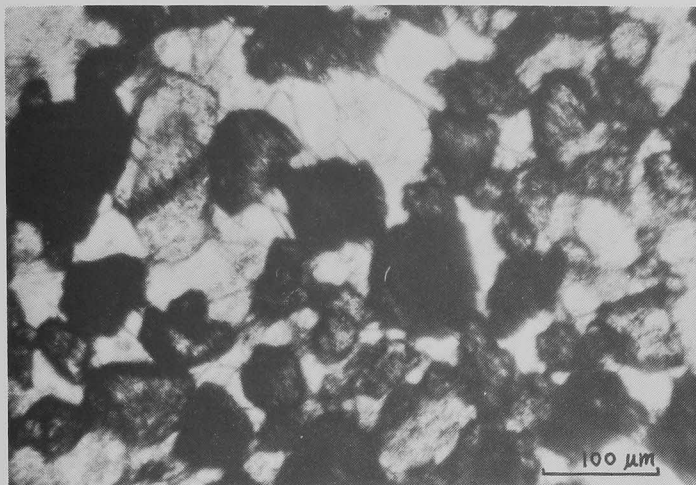


写真 4.13
微生物処理土のベッド化
状態（大阪南港粘土）
×150

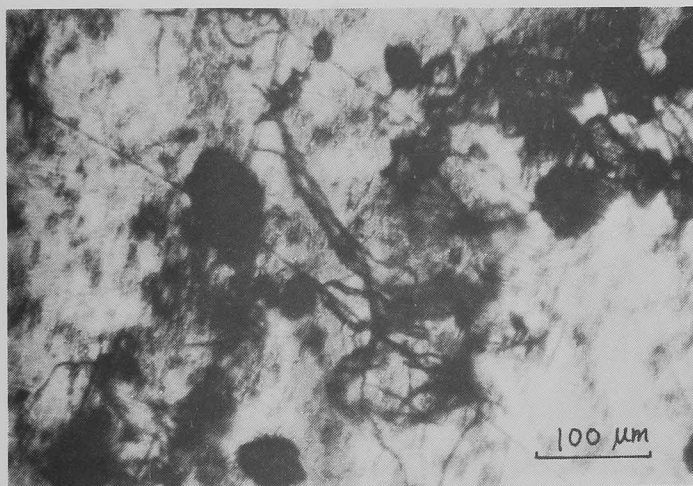


写真 4.14
微生物処理土のベッド化
状態（大阪南港粘土）×150

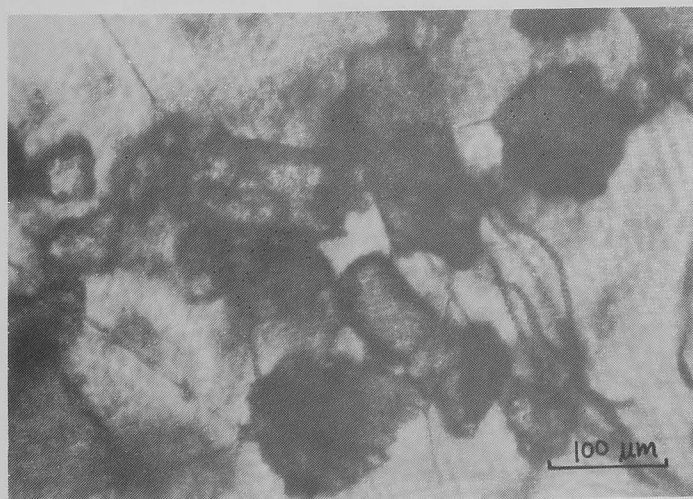


写真 4.15
微生物処理土のベッド化
状態（大阪南港粘土）×300

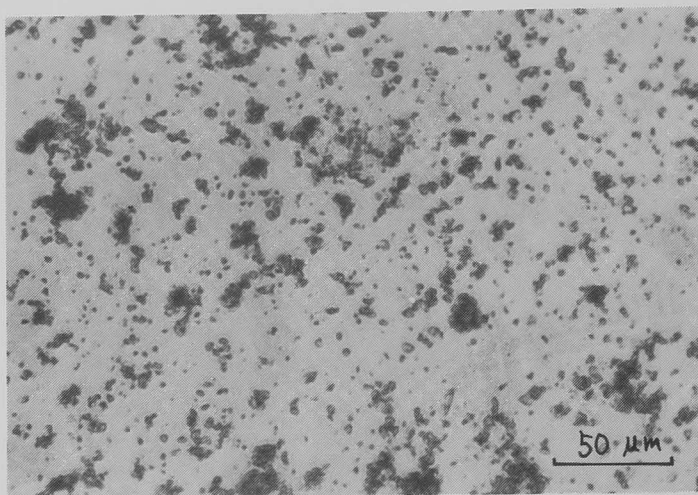


写真 4.16
微生物未処理土の分散状
態（モンモリロナイト）×300

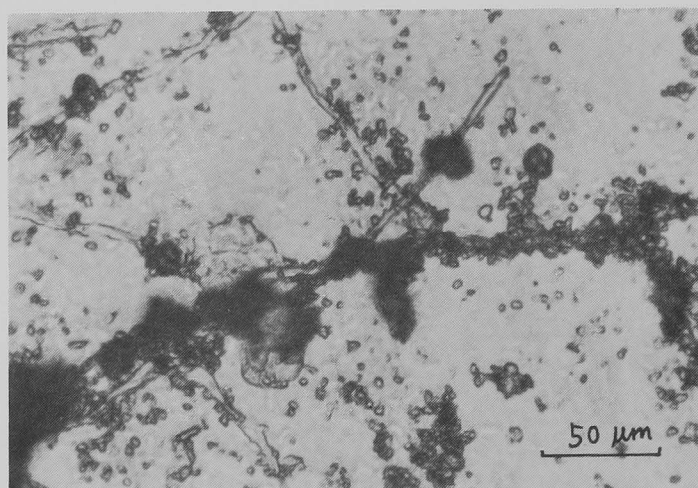


写真 4.17
微生物処理土のベッド化
状態（モンモリロナイト）
×300

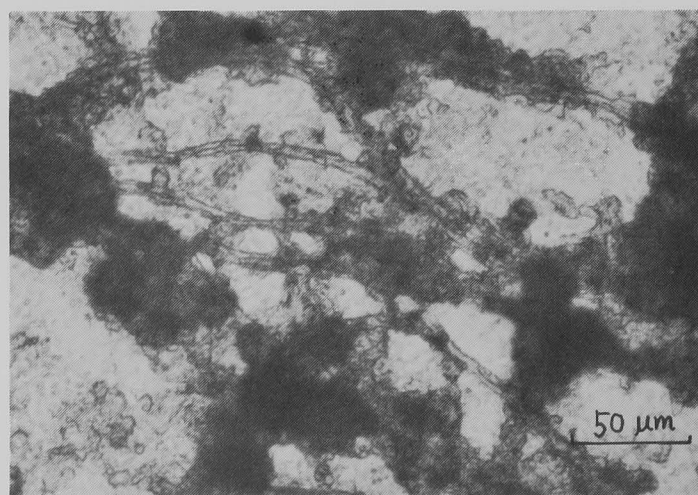


写真 4.18
微生物処理土のベッド化
状態（モンモリロナイト）
×300

(3) 工学的性質の改良については、まずせん断強度に着目し、それが微生物処理によって増大しており、かつ効果が時間の経過後も持続する。

(4) 処理土の透水性も改善され、未処理土と比較して数倍～10倍以上高くなる。

(5) 圧縮指数が増大し、変形量は大きくなる。

(6) 微生物処理土の締固め特性では、最適含水比の差は少ないが q_u を上昇させる。

(7) 微生物処理でえられる工学的性質の改良のメカニズムは、微生物の代謝による生成物質のベッド化作用に密接に関連している。処理土ではその細粒子分がベッド化され、より大きいものに变化していることが粒度分析の結果から明らかになった。

(8) 微生物の生成物質は、土粒子に物理吸着されるのみでなく、モンモリロナイトなどでは層間に吸着され $d(001)$ の間隔を膨潤させる。

(9) 生菌の数は養生期間の増大に伴って減少するにもかかわらず、改良効果を持続したことから、微生物による土の工学的性質の改良は生菌数ではなくて分泌される生成物質によることが明らかになった。

(10) 微生物の作用による改良効果は、特定の微生物種によってのみ生じるのではなくて、むしろ一般微生物の活動によって大きな効果がえられており、実際への応用においてコントロールが容易であることを示している。

4.4 結 論

本章では、第2章での超軟弱粘土の工学的性質の巨視的検討から、有機成分がその物性に大きな影響を及ぼしていることが明らかになったことをうけて、有機成分を積極的に利用すべく土中の作用を総合的に検討し、微生物の働きに着目してこれを土質安定へ応用するための基礎的知見をうるべく実験的考察を行ったものである。

第1節では、土中有機物に関して農芸化学・土壌学の分野で過去に多くの取り組みがなされているので、これまでの研究成果を概観して、土質工学への発展の方途を整理した。まず、土中有機物の種類と分類について論じ、腐植の形態ならびに分別抽出の方法に基づいて、本研究では改良SprengeI法に準じたことを述べた。さらに、土中有機物は単に有機成分を表現するのみであるが、土中に存在する生物として微生物の働きがきわめて重要であり、土中微生物の種類と作用とをとりまとめた。代表的微生物群として細菌・放線菌・菌類・藻類・原生動物を示し、これらが代謝を繰り返すための栄養源ならびに環境とを制御することによって、微生物の優先種をコントロールすることが可能である。そして微生物の土中での作用ならびに代謝産物の機能をまとめ、粘土粒子との相互作用によってベッド化を生じるものである。しかし、これまでの知見では、その取り組まれる研究分野の興味から粘土粒子と有機成分との間の結合性や反応性にのみ重点が置か

れ、生じるベッドの状態（例えばベッドの粒度分布）はもとより、工学的な性質については全く未知の分野として残されていた。

そこで第2節以降では、有機成分処理土の工学的性質の変化とその改良メカニズムとを明らかにしたものである。まず、有機物総量の変化による影響について検討した。土中有機物中の活性物質として腐植酸に着目し、それを抽出・再添加することによって有機成分処理試料を作成し、工学的性質として土粒子比重、コンシステンシー特性、圧密特性、強度特性について考察した。有機物の保水性の増大とベッド化によって土中のせん断抵抗を高め、強度増大をもたらしている。しかしながら圧密特性では変形量の増加と圧密遅延とをきたすものであり、その改良メカニズムとともに示した。

一方第3節では、微生物処理土の工学的作用を吟味し、最も強度増大をみこまれる微生物種として一般土中微生物をあげ、これを接種することと添加栄養源の種類を調整することによって大きなせん断強度を生じうることを明らかにした。さらに圧密特性においても、処理土において α_p 、 k が大きくなり、変形量の増加傾向は変わらないものの、圧密促進効果もみられ、第2節での有機成分処理土と一部反応性が異なる結果がえられた。締固め、コンシステンシー特性でも微生物処理土のせん断強度増大効果が知れた。これら工学的性質の改良効果のメカニズムを明らかにするために、粘土粒子のベッド化に基づいた反応性を検討した。まずベッドの状態変化として粒度分析結果を示し、ベッド化が主として粘土分のシルト分、砂分への移行によって生じることを明らかにした。この効果は生菌数が1～2週間で減少するのに対して、3ヶ月経過後でもベッド化が保持され、安定処理の改良効果が持続される要因ともなっている。微生物そのものよりも、微生物による生成物質が土粒子へ吸着されることによってこのような作用を生じるものであり、吸着の状況を全吸着量や層間吸着量を検討してこれを証明した。さらに菌類などによる土粒子のからめ通りの状況についても顕微鏡レベル下で示した。

このような微生物による土質安定処理の今後の課題として、微生物代謝に伴う生成物質の効果の長期安定性の問題と、微生物処理条件の管理の問題の2つが重要なテーマと考えられる。まず前者については、ベッド化作用をもたらす生成物質そのものが生存している微生物にとって栄養源であり、これを摂取することによってベッドに変化をきたすことがある。そのため形成されたベッドが破壊され、増大した強度が逆に減少する危険を有している。本研究では少なくとも実験室内レベルで3ヶ月養生試料までは単調に強度増加をえており、強度の減少はほとんど無視するものと予想されうるが、長期にわたる変化についても一応吟味しておく必要があろう。

また後者については、特定の微生物種ではなくて、一般微生物種を添加することが工学的性質改良のための効果が高いという大変好都合な結果をえているが、このときにも栄養源として炭素源、 N 、 P 、 K の補給が必須であり、大量の処理土に対する場合にはこれら栄養源の流亡を生じな

いようにすることが肝要である。

以上有機物に基づく土質安定処理について述べたが、次章ではこれに対応する無機物による土質安定処理の可能性について検討するものである。

参 考 文 献

- 1) 和田光史：土壌とくに火山灰土壌における腐植の集積に果す粘土の役割，粘土科学，10巻，1号，1970，pp.21～28.
- 2) 熊田恭一：腐植酸の化学，化学と生物，3巻，3号，1965，pp.121～128.
- 3) Kononova, M. M. : Soil Organic Matter, Pergamon Press, Oxford, 1961.
- 4) Flaig, W. : Effects of Microorganisms in the Transformation of Lignin to Humic Substances, *Geochimica et Cosmochimica, Acta*, Vol.28, No.10, 1964, pp.1523～1535.
- 5) Hurst, H. M. and Burges, N. A. : Soil Biochemistry, Ed. by McLaren and Peterson, Marcel Dekker, Inc., 1967, pp.260～286.
- 6) 京都大学農学部農芸化学教室編：新改版農芸化学実験書，3巻，1957，p.1003.
- 7) 山口和夫，山口辰良：最新応用微生物学入門，技報堂，1966，pp.14～69.
- 8) 都留信也：土と生態，共立出版，1971，pp.66～76.
- 9) Nahin, P. G. : Perspectives in Applied Organo-Clay Chemistry, Proc. 10th Nat. Conf. Clays and Clay Minerals, 1963, pp.257～271.
- 10) Beutelspacher, H. : Wechselwirkung zwischen Anorganischen und Organischen Kolloiden des Bodens, *Zeitschrift für Pflanzenernährung Düngung Bodenkunde*, Vol. 69, 1955, pp.108～115.
- 11) 粘土ハンドブック編集委員会編：粘土ハンドブック，技術堂，1967，pp.107～114.
- 12) Michaels, A. S. : Rheological Properties of Aqueous Clay Systems, *Ceramic Fabrication Process*, Ed. by Kingery, Technology and John Wiley, 1958, pp.23～31.
- 13) Greenland, D. J. : Interactions between Humic and Fulvic Acids and Clays, *Soil Science*, Vol.3, No.1, 1971, pp.34～41.
- 14) Waksman, S. A. and Martin, J. P. : The Role of Microorganisms in the Conservation of the Soil, *Science*, Vol.90, 1939, pp.304～305.
- 15) Peele, T. C. : Microbial Activity in Relation to Soil Aggregation, *Jour. Amer. Soc. Agron.*, Vol.32, 1940, pp.204～212.

- 16) Harris, R. F., Chesters, G. and Allen, O. N. : Dynamics of Soil Aggregation, Advanced in Agronomy, Vol.18, 1966, pp.107 ~ 169.
- 17) McCalla, T. M. : Jour. Bacteriology, 1940, pp.23 ~ 43.
- 18) Martin, J. P. and Waksman, S. A. : Decomposition and Aggregating of Fungus Cell Material in Soil, Proc. Soil Scie. Soc. Amer., Vol.23, 1959, pp.217 ~ 220.
- 19) Matsuo, S. and Kamon, M. : Engineering Properties of the Inferior Clayey Soil Material and its Improvement, Proc. 1st Aust. Conf. Engineering Materials, 1974, pp.385 ~ 410.
- 20) Hori, S. and Okuda, A. : Purification of Humic Acid by the Use of Ion Exchange Resin, Soil Science and Plant Nutrition, Vol.7, No.1, 1961, p.4.
- 21) Lo, K. Y. : Secondary Compression of Clays, Proc. ASCE, Vol.87, SM4, 1961, pp.61 ~ 87.
- 22) Matsuo, S., Kamon, M. and Pham, N. L. : Influences of Microorganisms on Engineering Properties of Soft Clay, Proc. 9th Int. Conf. SM&FE, SS11, Vol. 1, 1977, pp.421 ~ 436.

第 5 章 多価カチオンと土質安定

5.1 多価カチオンの作用

5.1.1 多価カチオンの変化と土中での働き

金属の酸化は自然界において腐食という形をもって現われる。金属腐食は屋外構造物を初め、地下埋設物、自動車、船舶、航空機、化学装置などあらゆる分野に用いられる金属材料に生じている。腐食の発生はこれらの機能と形態に多大の障害をもたらすものであるために、防食技術の研究開発が多方面で取り組まれている。特に近年は天然金属資源の損失防止という観点からもその重要性が増大している。ところが、ここで発想を転換し逆に金属腐食を積極的に促進させて、それをもって地盤の安定化に展開しうる可能性がある。このような研究の動機はつきのごとくである。

庭先などで穴を掘ったとき土中の釘や、鉄材が酸化腐食して、そのまわりの土が褐色に変色し土の性質が砂質土的なものになっているのに出くわすことがある。このことから土中に鉄を導入するとそれが酸化した段階で、軟弱な粘性土が砂のような性質を帯びるようになることが予想される。実際、建設工事現場などでよくみられるように鋼矢板を打ち込んだところ、矢板の腐食が進行しこれを引き抜くために多大の力を必要とすること、また矢板のまわりに多量の土が付着してくることからも、土中に入った鉄が酸化過程に土と反応して上に述べたような作用を引き起こしているものと思われる。したがって、土中に入った鉄の酸化過程を検討することは軟弱な粘土の安定処理上きわめて興味深いものがある。¹⁾

一方、地盤中に含まれる金属成分を検討すると土粒子の結合物質（セメンテーション材料）として、水酸化鉄、アルミなどの存在がある。両者は土粒子そのものの構成元素であって、一般に鉄分はFeOに換算して10%程度、アルミウム分は Al_2O_3 に換算して30%程度含有される。結合物質となるのは、これらが風化、溶脱、沈積などによって非晶質状態となり粒子界面に存在する場合に相当している。よってこのような鉄分、アルミニウム分を人為的に土中に付与すれば、地盤安定上効果の大きいことが容易に考えられる。

ところで、Pourbaix(1966)²⁾は金属の酸化特性に関する熱力学的データを簡便にまとめた電位－pH図表を考察した。これは水中におけるあらゆる金属の電気化学的な挙動と腐食性に関連するものである。あるpHおよび電位において金属が反応するかどうか、反応して特定の酸化物または錯イオンを生成するかどうかを一目瞭然に示すという利点をもっている。よって酸やアルカリ溶液中に金属を浸したとき、あるいは外部からの操作である電位に保ったときの金属の平衡状態を知ることができる。図5－1は鉄とアルミウムのPourbaix図表である。³⁾ 図中の斜線領域

①が溶解による腐食であり、縦線領域②が酸化物または水酸化物になりそれ以後は腐食されない状態であり、無色の領域③が裸かの金属のままで安定な状態に対応している。鉄では H^+ 、 OH^- および電子を含む反応であり、アルミニウムではほとんど H^+ と OH^- (水素イオン濃度)のみに依存した反応であることを表現している。

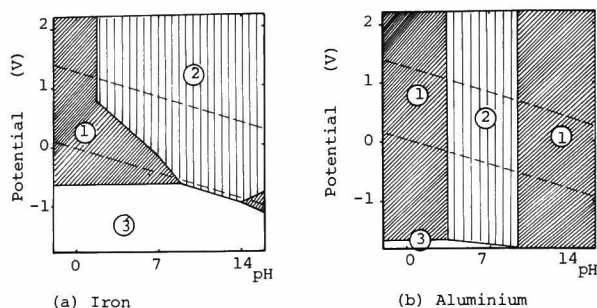


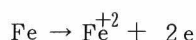
図 5-1 Pourbaix 図表

よって多価カチオンによる土質安定は、まず金属粉（鉄やアルミニウム）を Pourbaix 図表中の斜線領域①の状態になるようにして溶解させ、それを図の縦線領域②の部分にとどめると酸化物、水酸化物が形成されることがわかる。酸化促進による土質安定としてはこのようなメカニズムにするのが最も望ましい。

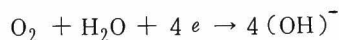
本研究では多価カチオンとして鉄イオンとアルミニウムイオンとに着目しているが、そのうちでも前者の作用に重点を置くものである。そこで以下には鉄酸化について説明する。

金属鉄の腐食酸化機構を簡単に示すとつぎのようになる（図 5-2 参照）⁴⁾。

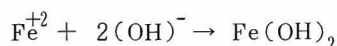
まず鉄がイオンとなって溶出する部位（カソード）では



という 1 つの反応が起こっている。さらに別の部位（アノード）では酸素が溶液中の水分子および鉄の方から余分になった電子と反応して、



となる。この両者が反応して、



となって、ここに水酸化第 1 鉄と呼ばれる物質ができることになる。これがさびの一番始めにできる物質と考えられている。しかしこの物質 ($Fe(OH)_2$) は非常に酸化されやすく、微量の酸素があると直ちに反応を起こす。この変化はまわりの環境に大きく支配される。そこで次項では土中での鉄酸化物の出現状態をとりまとめている。

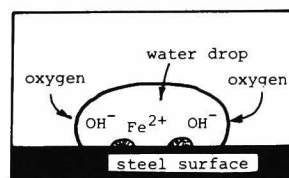


図 5-2 鉄の腐食の機構

5.1.2 土中での鉄酸化物の出現の仕方

土中に存在する鉄酸化物の形態はつぎのようにまとめられる（Oades, 1963）⁵⁾。

(i) ゲタイト (Goethite) : αFeOOH

- ① 低い pH 溶液中の第 2 鉄の沈積 (反応速度は遅い)
- ② $\text{Fe}(\text{OH})_3$ が高い pH と温度下におかれたとき
- ③ 炭酸イオンの存在下で炭酸第 1 鉄や水酸化第 1 鉄の酸化

土中でのゲタイトの形成はこの 3 つの場合に生じるが、①の場合が最も生じやすい。

(ii) レピドクライト (Lepidocrite) : γFeOOH

これは第 2 鉄から直接生じることはなく、第 1 鉄の酸化によって生じる。

- ① 炭酸イオンの存在しない pH 4 ~ 8 の状態で水酸化第 1 鉄が酸化されるとき。
- ② 炭酸第 1 鉄や硫酸第 1 鉄の酸化

レピドクライトは炭酸イオンや酸素イオン濃度が低い条件で生じやすい。そのため地下水面下の低いところでよくみられる。

(iii) ヘマタイト (Hematite) : $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$

- ① 充分高温に熱せられるとすべての鉄酸化物はヘマタイトになる。
- ② 希薄アルカリ溶液中で高温下におかれた水酸化第 2 鉄
- ③ FeCO_3 の薄膜を急速乾燥したとき。

ヘマタイトの自然界での形成は、乾燥気候で高温条件が必要なため、湿潤地域ではほとんど起こりえない。

(iv) マグネタイト (Magnetite) : Fe_3O_4

- ① 第 1 鉄と第 2 鉄イオンが混在しているとき。
- ② 溶液中で第 1 鉄イオンがゆっくり酸化されたとき。
- ③ 低温で H_2O_2 によって水酸化第 1 鉄が酸化されたとき

(v) マグヘマイト (Maghemite) : $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$

Bernal ら (1959)⁶⁾ によって同定されたもので、マグネタイトの酸化によって生じる。また有機物の存在下において形成されることがある。

(vi) 非晶質の水酸化第 2 鉄

- ① 水酸化第 2 鉄ゲルの養生
- ② 第 1 鉄化合物の加水反応

土中の非晶質第 2 鉄は②の反応によることが多い。

鉄酸化物としてはこのほか βFeOOH 、 δFeOOH の存在が知られているが、自然界では未だ認められていない。これらの反応を整理すると図 5-3 のようになる。

以上のごとく、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} のように溶解した鉄イオンの土中における出現形態はきわめて複雑であり、その同定は工学的にあまり意味をもたないものである。土中ではゲタイト、レピドクラ

The flowchart illustrates the various chemical pathways for the formation of different iron oxide and hydroxide minerals from iron ions in aqueous or near-aqueous environments. The pathways are as follows:

- Fe³⁺ Pathway:**
 - Oxidation/Reduction:** Fe³⁺ can be oxidized to Fe²⁺ or reduced from Fe²⁺ (Ox., Red.).
 - Precipitation:** Fe³⁺ undergoes "Slow Pptn. low pH" to form α-FeOOH.
 - Hydroxide Formation:** Fe³⁺ reacts with OH⁻ to form Fe(OH)₃.
 - Aluminosilicates:** Fe³⁺ can form "iron rich clay minerals" (Al₂O₃ + SiO₂) through precipitation.
 - Transformation of α-FeOOH:**
 - Aging:** α-FeOOH can be aged under "high pH, temp." to form Fe(OH)₃ or under "high temp." to form γ-Fe₂O₃.
 - Dehydration:** α-FeOOH undergoes dehydration to form γ-Fe₂O₃.
 - Aging in alkali:** α-FeOOH can be aged in "dilute alkali" to form γ-Fe₂O₃.
- Fe²⁺ Pathway:**
 - Precipitation:** Fe²⁺ undergoes "Slow Pptn." with OH⁻ to form Fe(OH)₂.
 - Oxidation:** Fe²⁺ can be oxidized to Fe³⁺ or to Fe₃O₄ (Fe²⁺ + 1/2 O₂ → Fe₃O₄ + 2H⁺).
 - Transformation of Fe(OH)₂:**
 - Oxidation:** Fe(OH)₂ can be oxidized to Fe₃O₄ (slow) or to Fe(OH)₃ (instant).
 - Dehydration:** Fe(OH)₂ undergoes dehydration to form Fe(OH)₂ Crystalline.
 - Slow Oxidation:** Fe(OH)₂ can be slowly oxidized by H₂O₂ at 100°C to form γ-Fe₂O₃.
- Central Transformations:**
 - Fe₃O₄ to γ-Fe₂O₃:** Fe₃O₄ can be converted to γ-Fe₂O₃ via "Instant Ox." or "Ox. at high temp." followed by "Dehydration".
 - γ-Fe₂O₃ to α-Fe₂O₃:** γ-Fe₂O₃ can be converted to α-Fe₂O₃ via "Dehydration" or "High temp.".
 - Hydrohematite:** Fe(OH)₃ can be aged at "pH 4-7" to form "Hydrohematite", which then transforms into γ-Fe₂O₃ upon "Aging at high temp.".
- Final Formation:**
 - Ignition:** "Ignition in presence of organic material" leads to the formation of γ-Fe₂O₃.
 - Amorphous to Crystalline:** "Alpha iron oxides or amorphous iron oxides" transform into γ-Fe₂O₃ upon ignition.

(ii) 高含水比条件の場合

試料の湿潤状態を保持して、2000 μ mフルイ通過分を攪拌機で繰り返し、初期含水比を実験目的に沿って調整して用いる。初期含水比の調整は水分の除去として大型超遠心分離機によっている。

(2) 多価カチオンの配合

添加剤として用いた多価カチオンはFeとAlである。Fe源としては鉄粉（還元鉄粉）を、Al源としてはポリ塩化アルミニウム（PAC、10%のAl₂O₃を含む）溶液を用いた。その配合は表5-2のとおりである。ここで添加量はmol/100g粘土とし、100gの乾燥粘土重量に対する添

表5-2 多価カチオンの配合条件

(a) Case of Iron-treatment

Sample No.	Added iron powder (mol/100g clay)
I-1	0.0
I-2	0.01
I-3	0.03
I-4	0.05
I-5	0.10
I-6	0.20

(b) Case of Iron-Aluminium treatment

Fe(mol/100g clay)	Al(mol/100g clay)				
	0.0	0.01	0.05	0.10	0.20
0.0	A-1	—	—	—	—
0.002	B-1	—	—	—	—
0.005	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
0.010	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
0.020	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5

(c) Case of Complex treatment

	A kind of treatment	Amount(mol/100g clay)	
A	Non-treated clay	1	0.01
B	Panflox(500ppm)+Fe Powder	2	0.03
C	Fe Powder	3	0.05
D	Removal of organics by H ₂ O ₂ +Fe Powder	4	0.10
		5	0.20

加金属のモル数で表わした。

鉄処理のみの場合、鉄とアルミニウム処理の場合、複合処理の場合について検討を行っている。なお複合処理とは、第4章で明らかにしたように有機物による土質安定処理効果、特にそのベッド化効果に着目したものであって、有機物としては高分子凝集剤のパンフロックスを鉄処理に添加したものである。

(3) 試験方法

(i) 低含水比条件の場合

締固め特性の把握のためには、ハーバード型小型締固め試験機を用いている。

各配合試料の締固め曲線それぞれ非線り返し法によって求め、さらにこれらの最適含水比(W_{opt})で締固めた試料について種々の養

生条件下で強度試験（1軸圧縮試験）を行った。また一部では、締固め曲線と1軸圧縮強度(q_u)

との対応から q_u が最大となる含水比で締固めた試料の養生試験も併用している。養生条件としては20℃の気乾条件とパラフィンシール条件の2種を選定した。

物理特性としてのコンシステンシーの変化は、安定処理によって軟弱粘土が相当砂質土の性格を帯びようになるため、液性限界、塑性限界を通常の方法（JISA1205,1206）で求められない。そこで液性限界についてこれとほぼ対応するファインネスナンバー（ F 値）で代替した。

(ii) 高含水比条件の場合

締固め試料のように含水比があまり高くないものを取り扱うことは、多価カチオンの反応機構の追求のための意義はあっても、軟弱粘土の安定処理としての工学的性質の改変を明らかにしたものとは必ずしもいえない。本研究のように軟弱な粘性土では締固めが可能となる場合の方がむしろ少ないものである。そこで多価カチオンと軟弱粘土との反応性の検討のためには高含水比条件の場合を省略することができない。

沈降試験としては初期含水比 500%，その他の試験には初期含水比を液性限界の含水比に調整している。

圧密試験は載荷重 0.01 kg/cm^2 で予備圧密し、養生期間は1ヶ月、3ヶ月として圧密特性を検討した。急速段階載荷圧密試験を行っている。先行荷重(p_0)が 0.01 kg/cm^2 とかなり小さい値としたのは軟弱地盤の処理を対象としているため、自重圧密状態の場合、及び浅層の安定処理の場合などを想定しており、処理土の圧縮性が問題となるのはそれ以降の載荷が重要とみなされるためである。

さらに強度試験については、ベンセン断試験（角速度 1 ラジアン/min ）と静的コーン貫入試験（コーン先端角 60° ，コーン重量 60 g ）の2種類を実施した。

5.2.2 鉄処理土の工学的性質¹⁾

(1) コンシステンシー特性

測定結果は図5-4、5-5のとおりである。図5-4はシール養生したものであるが、鉄粉を添加し養生の経過につれて F 値が大幅に減少している。図5-5の気乾養生では減少割合がさらに大きくなっている。養生期間と F 値の関係では養生期間の増加に伴って減少しているが、養生期間1ヶ月と3ヶ月の試料ではあまり差がみられていない。このことは1ヶ月ないし3ヶ月で添加した鉄粉の酸化変化がほぼ飽和状態に達していることを示唆している。ここで添加直後の試料において鉄粉添加量の増大とともに F 値が減少しているが、これは添加鉄粉の粒度分布（5.3.2 参照）が 0.1 mm 以上80％であることから、処理試料中の粗粉分の増加によるものであると考えられる。

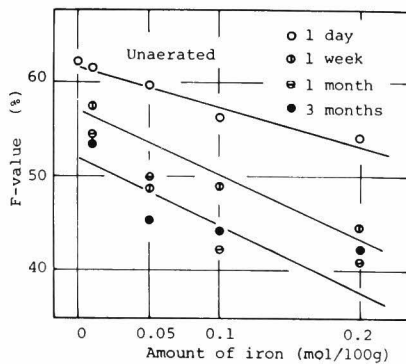


図5-4 鉄処理土（シール養生）のコンシステンシー特性

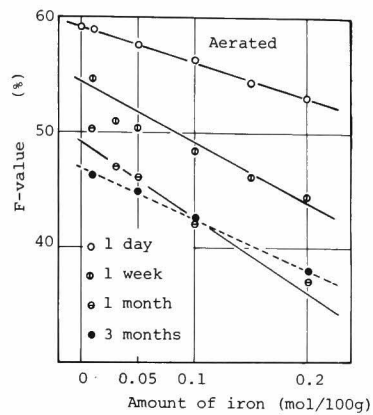


図5-5 鉄処理土（気乾養生）のコンシステンシー特性

(2) 締固め特性

締固め曲線は図5-6のとおりである。鉄粉の添加量の増大とともに乾燥密度 (γ_d) が増大している。しかしながら、鉄粉を添加することによって良く締固まるようになり密度が増大したというよりも、試料の状態からみると、鉄粉の重量だけ乾燥密度が増大したとみなす方が妥当であるように考えられる。そこで添加した鉄粉空間に土粒子を置き換え、粒度分布は仮に同一として新たな乾燥密度 γ'_d を算定しなおした。すなわち、 $\gamma_d (=W_s/V)$ の W_s をつぎのように補正した。

$$W'_s = W_{si} + W_{so}$$

ここで、 W'_s : 補正乾燥重量

W_{si} : もとの土のみの乾燥重量

W_{so} : 鉄粉が入った空間を土としたときの乾燥重量

鉄粉の乾燥重量を W_{Fe} , 比重を G_{Fe} とすると、仮定により

$$\frac{W_{Fe}}{G_{Fe}} = \frac{W_{so}}{G_s}$$

ゆえに、

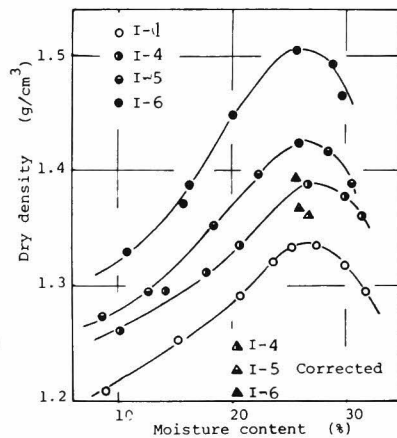


図5-6 締固め特性

$$W_s' = W_{si} + W_{Fe} \cdot \frac{G_s}{G_{Fe}}$$

今、添加率を a とすると、

$$a = \frac{W_{Fe}}{W_{si}}$$

となる。

$$W_s = W_{si} + W_{Fe} = W_{si} (1 + a)$$

であるから、

$$\begin{aligned} \gamma_d' &= \frac{W_s'}{V} = \frac{W_{si} + W_{Fe}}{W_s} \frac{G_s}{G_{Fe}} \gamma_d \\ &= \frac{1 + a \frac{G_s}{G_{Fe}}}{a + 1} \cdot \gamma_d \end{aligned}$$

えられた γ_d' が図5-6の△印である。無添加の γ_d と補正值の γ_d' の比率は4%程度の差となり、乾燥密度の増大はほとんど鉄粉の重量によるものと結論づけられる。

さらに、最適含水比 (W_{opt}) は25%程度 (南港粘土の場合) であり、処理による変化はみられない。これらの結果は、鉄粉を混合処理した時点においては処理土の性状がほとんど変化しないことを表わしている。

(3) 強度特性

1軸圧縮試験の結果 (W_{opt} の含水比で締固めた後養生した試料) は図5-7のとおりである。図には気乾養生とシール養生との場合を別々に示した。鉄粉添加後直ちに圧縮試験を行った場合、1軸圧縮強度 (q_u) は添加量にかかわらずほぼ一定値をとっている。ただ気乾条件では1日後でも強度増加がみられ、かなり酸化が進行するために強度の増大を示している。一般に鉄粉の添加量の増大とともに強度が増大する。さらに養生期間の経過とともに強度増加は著しい。シール養生時には特に3ヶ月養生で相当量の増加をみている。養生による酸化鉄の生成に

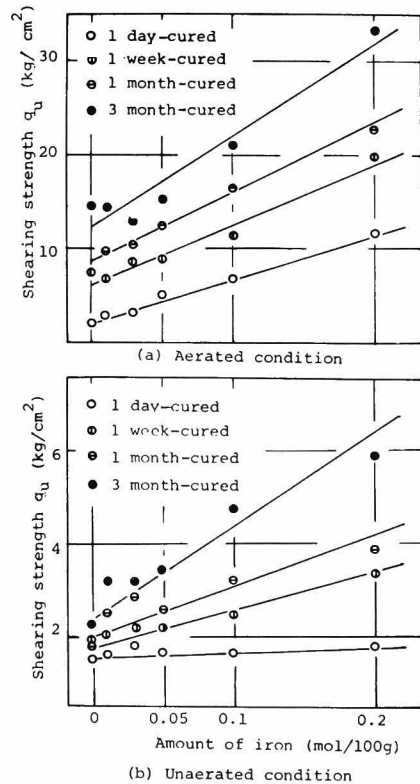


図5-7 q_u の変化

よって、セメンテーション効果が発揮され強度増加にあずかっているものと予想される。気乾養生では強度増加の絶対値は大きい、養生期間の増加とともに添加量にかかわらずほぼ平行に強度増加をきたしており、これは供試体の含水比の減少効果が大きく関与しているためである。

上述のごとく、1軸圧縮試験の結果、 q_u が含水比に大きく支配されていることが明らかであり、特に気乾条件下で著しい。含水比の減少に伴う強度の増大はこれまでも多くの報告例があり、一般に含水比と強度の対数とが直線関係にあるといわれている。そこで処理土の効果と含水比による影響とを分離して考察することが必要となってくる。ここでは特に気乾養生した試料と、酸化過程を経ない試料との比較を行った。酸化過程を経ない試料とは、締固めによって作成した供試体を、直ちに真空容器に入れて脱水し強度試験を実施したものであり、種々の含水比を与えるためには真空ポンプ

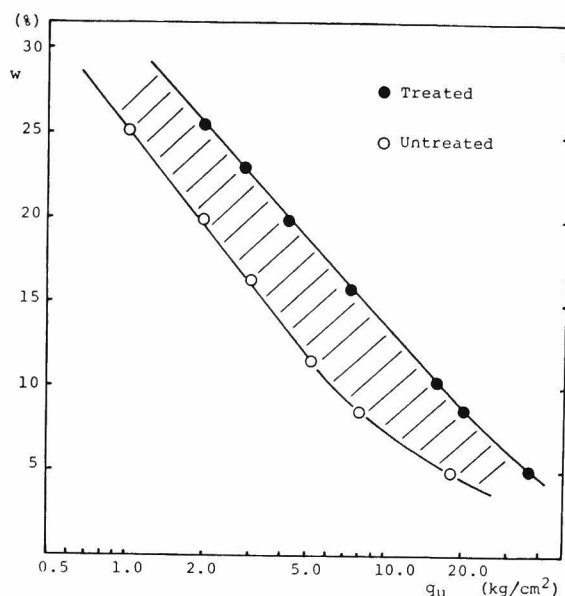


図 5-8 q_u と含水比の関係

の稼動時間を変化させている。これらを片対数紙上にプロットしたものが図5-8である。この図の斜線部分が酸化鉄に起因する強度増加とみなしうる。図から明らかなように添加した鉄粉が酸化過程を経ることによって q_u に約2~3倍の増加がみられている。さらに、鉄粉を添加しても酸化過程を経なければ q_u は含水比のみに依存し、添加量そのものはほとんど強度増加に関与しないことがわかる。また、含水比と $\log q_u$ の関係は含水比が極端に低くなってくると、やや直線性がなくなっているが、このことは供試体の乾燥の過程で土粒子間が接近し、van der Waals力が強力に働いてくるため、 q_u の増加率が大きくなる傾向を示すものと予想される。しかしながら、この現象はもちろん多価カチオン処理とは無関係に考えられるべきものである。

以上は低含水比条件下での特性であるが、高含水比条件下の圧密特性として次のようになる。

(4) 圧密特性

まず圧密荷重段階ごとの沈下量を示したものが図5-9である。図は3ヶ月養生時の結果であるが、圧密荷重 1.0 kg/cm^2 付近において鉄粉添加量にかかわらずほぼ等しい圧縮量を示し、その荷重の前後で沈下の傾向が逆転している。すなわち、図5-10に模式的に示すように荷重が 1.0 kg/cm^2 近傍以下では沈下量に鉄粉添加量の少ないものほど大きく、荷重がそれ以上では添加量

の多いものほど沈下量が大き
なっている。これは降伏荷重
(p_y)に相当するものであり、
処理土の硬化の状況が読みと
れる。供試体は養生条件とし
て 0.01 kg/cm^2 の先行荷重
(p_0)をうけているものの、
養生期間中の鉄酸化が粒子間
のセメンテーションをなし、
強い骨格構造を形成する。こ
の骨格構造が圧密荷重の小さ
い範囲で荷重に抗して沈下量

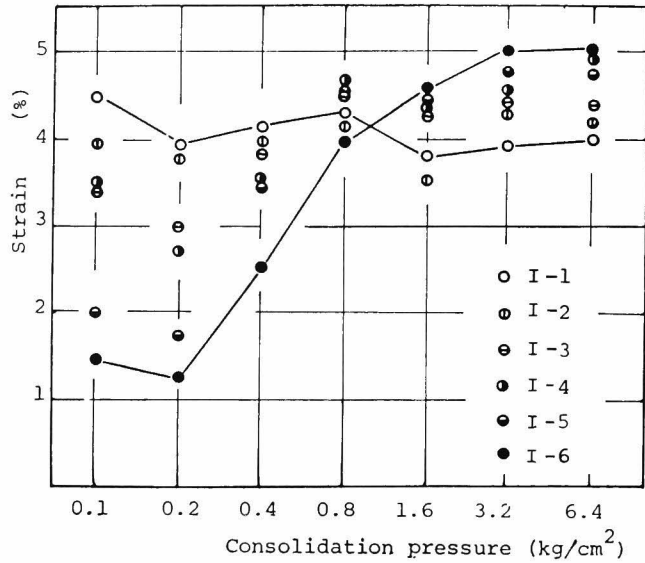


図5-9 圧縮特性

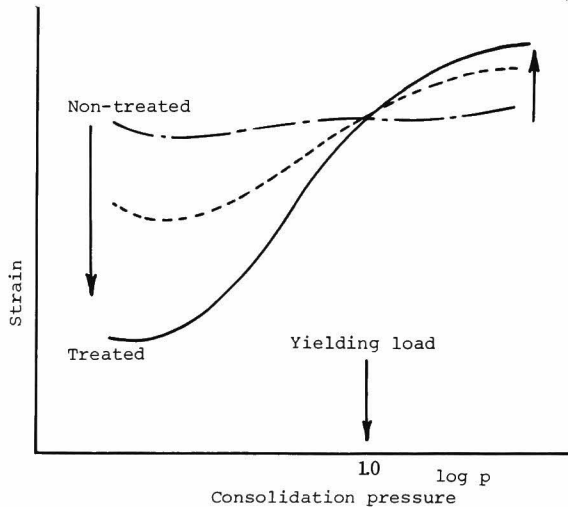


図5-10 処理による沈下性状の変化の模式図

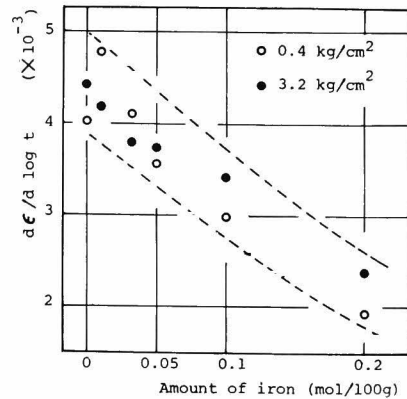


図5-11 2次圧密特性

を少なくしている。しかし荷重が 1.0 kg/cm^2 付近でこの構造が破壊されるため沈下が増大する
と考えられる。図5-11は、このときの2次圧密特性を表わしている。降伏荷重(p_y)の前後の
荷重条件を示した。荷重条件のちがいで2次圧密量には有意の差がみられない。それに対
し、鉄粉添加量の増加につれて2次圧密量が減少している。これは p_y を越えた条件の場合でも2
次圧密量は処理土の方が小さくなっていることを示し、取り扱いやすい土質条件がえられてい
ると結論することができる。

5.2.3 鉄・アルミニウム処理土の工学的性質

姫島粘土に対して鉄・アルミニウム処理をほどこして検討している。用いた試料の配合条件は表5-2(b)のとおりである。記号のAからEにいくに従ってアルミニウムイオン量が増加し、添番号が大きくなるにつれて鉄イオン量が増加していることを表わしている。

(1) 締固め特性

えられた締固め特性は図5-12のとおりである。鉄・アルミニウムの添加による締固め曲線の変化は5.2.2で述べたのと同様にほとんどみられない。図には同時に1軸圧縮強度 q_u を示したが、この2つの曲線から最大乾燥密度に対応する W_{opt} (30%)と

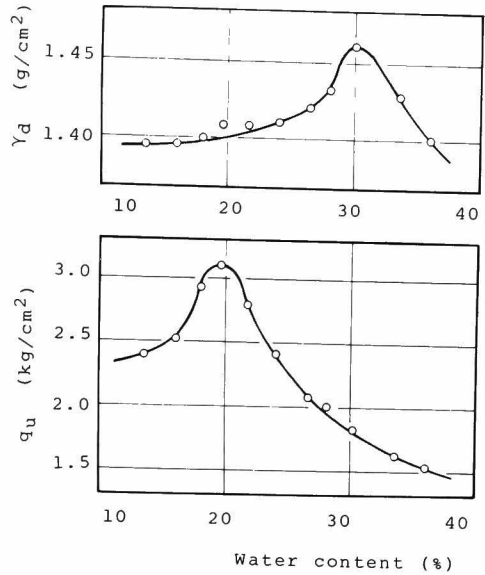


図5-12 鉄・アルミニウム処理土の締固め特性

最大の q_u に対応する含水比(20%)を初期含水比として添加による強度特性の研究に用いている。

(2) 強度特性

(i) 低含水比条件の場合(1軸圧縮強度特性)

初期含水比30%, 20%で締固めたものについて、気乾及びパラフィンシール養生条件で20℃の恒温室内で養生した。えられた結果は図5-13~5-20までである。初期含水比の相違は初期の強度に差を生じるのみで、特性そのものにはそれほどの変化がみられないことがわかる。養生条件の差によって整理するとつぎのようになる。

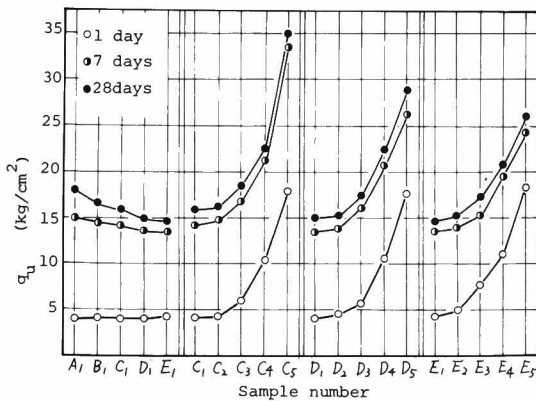


図5-13 気乾養生試料の q_u ($w_i = 30\%$)

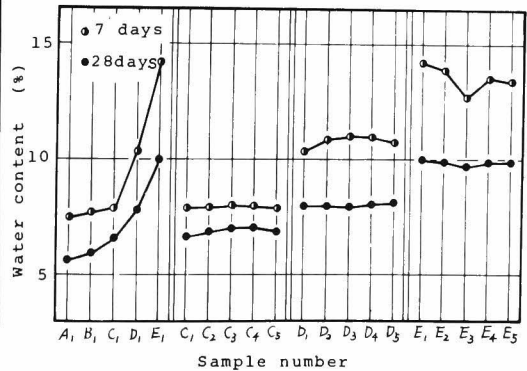


図5-14 気乾養生試料の含水比($w_i = 30\%$)

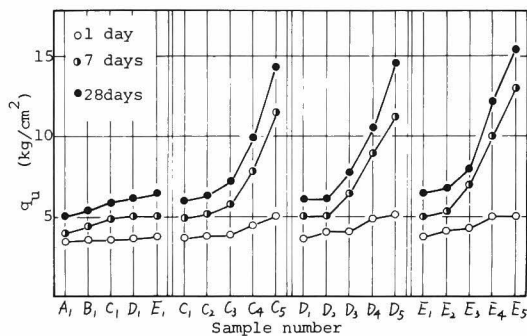


図5-15 シール養生試料の q_u ($w_i=30\%$)

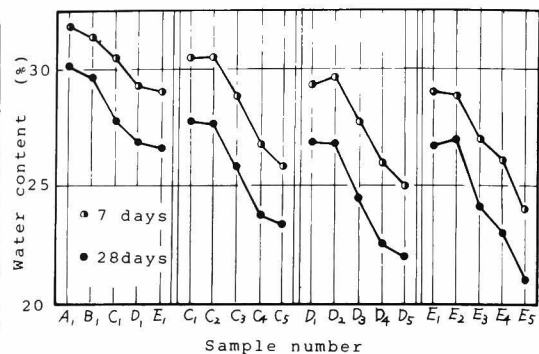


図5-16 シール養生試料の含水比 ($w_i=30\%$)

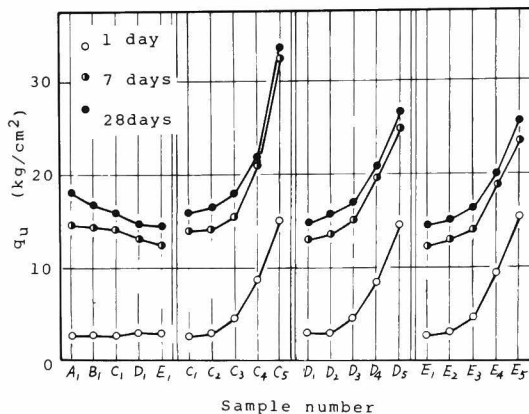


図5-17 気乾養生試料の q_u ($w_i=20\%$)

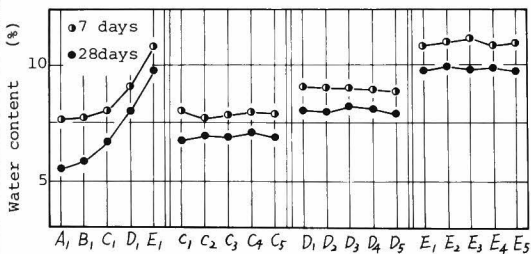


図5-18 気乾養生試料の含水比 ($w_i=20\%$)

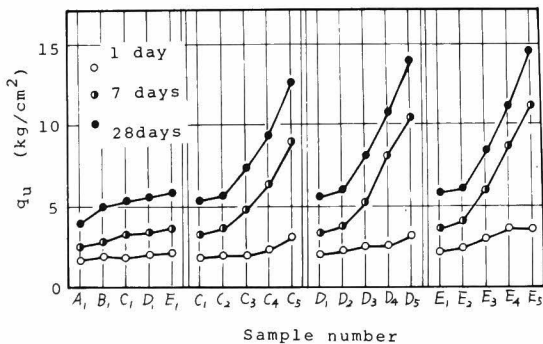


図5-19 シール養生試料の q_u ($w_i=20\%$)

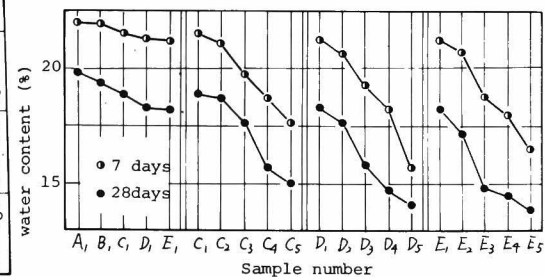


図5-20 シール養生試料の含水比 ($w_i=20\%$)

気乾養生では、鉄イオンが多いものほど1日経過で相当大きい強度の増大がみられ、養生期間の増加とともに強度が増大している。これに対して、アルミニウムイオンの添加によっては添加量の増加に伴って q_u はむしろ減少しており、それに対応して含水比が高くなっている。したがって、含水比に及ぼす鉄イオン添加の影響は相対的にきわめて小さいものとなっている。一方、シール養生では、添加後1日では強度の変化はほとんどみられない。養生期間が長くなると強度の

増加は明瞭であり、添加量に伴って強度が大きくなっている。アルミニウムイオン添加によって、わずかな強度増加がみられている。含水比は添加量の増加に伴って減少する傾向を示した。

図 5-21,

5-22は q_u と含水比の関係であるが、養生条件によって両者に大きな差がみられている。すなわち、図5-21

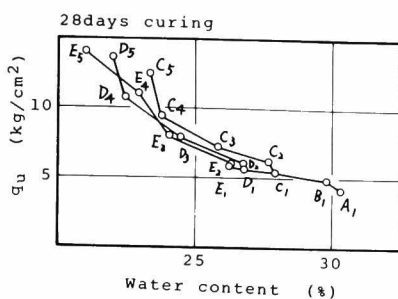


図5-21 q_u と含水比(シール養生, $w_t=30\%$)

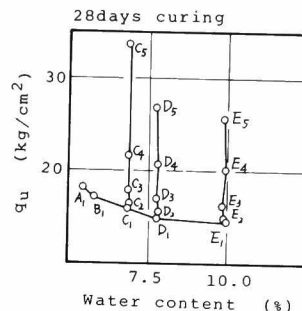


図5-22 q_u と含水比(気乾養生, $w_t=30\%$)

のシール養生では含水比変化が $Al(OH)_3$ の形で土粒子にとりかこまれペッド化を示し、鉄の酸化による水の消費とあいまって強度増大をもたらしている。また図5-22の気乾養生では、たとえば $Al(OH)_3$ 化が生じてても他の自由水の乾燥による含水比低下の方が著しく、鉄イオン添加による強度増加と水分乾燥に基づく強度増加が生じているものである。

(ii) 高含水比条件の場合(ベーンセン断強度特性)

5.2.1 に述べた条件下で、塩化ビニールパイプ容器中にて、添加混合静置された試料について、その容器の上層と下層のせん断強度を求めたものである。図5-23, 5-24 のとおりである。

アルミニウムの添加量の多いほど、せん断強度は大きな増加を示しており、かつ鉄イオンの添加によってそれが促進されているのが明らかである。鉄とアルミニウムの両イオンの相乗効果を

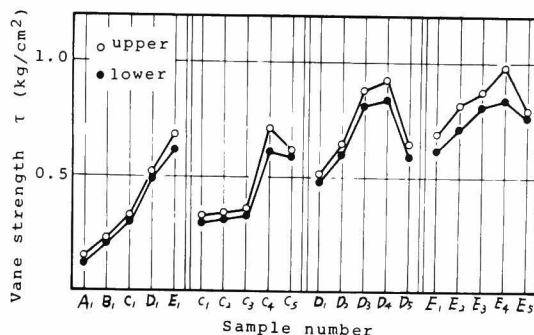


図5-23 ベーンセン断強度

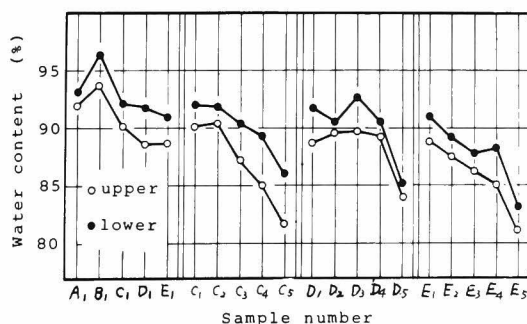


図5-24 処理による含水比の変化

期待したが、高含水比条件下においてPACによるペッド化と鉄イオン添加による固が貢献しているものである。

5.2.4 複合処理土の工学的性質

これまでの検討結果によれば、添加した鉄イオンの酸化と処理土のベッド化とが安定処理効果の向上に寄与していると予想される。そこで、ここでは有機物処理によるベッド化効果とそれが鉄処理土の酸化促進に及ぼす影響等を明らかにするために複合処理をとりあげたものである。

ところで、用いた南港粘土には元来有機物が5.1%含まれているため、これまでの考察が有機物を含んだものに対してなされていたと考えられる。よって、南港粘土から人為的に有機物を除去した試料と、人工有機物（パンフロック：500 ppm）を南港粘土に添加したものについて検討する。用いた試料の配合条件は前掲の表5-2 (C)のとおりである。なお有機物除去処理には10% H_2O_2 溶液での煮沸（3回繰り返し）操作を用いた。無処理試料をA，人工有機物と鉄粉処理試料をB-系統，鉄粉処理のみ試料をC-系統，有機物除去試料に鉄粉添加したものをD-系統と称している。

(1) 締固め特性

B，C，D-系統は、それぞれの系統内で鉄粉添加による最適含水比，最大乾燥密度の変化はなく，B，C-系統は無処理のAとはほぼ同一の締固め曲線を持つ。ところが図5-25に示すように各処理系統の比較ではD-系統の r_d maxが他の場合より大きく， W_{opt} が小さくなっている。これは有機物除去のD-系統で、

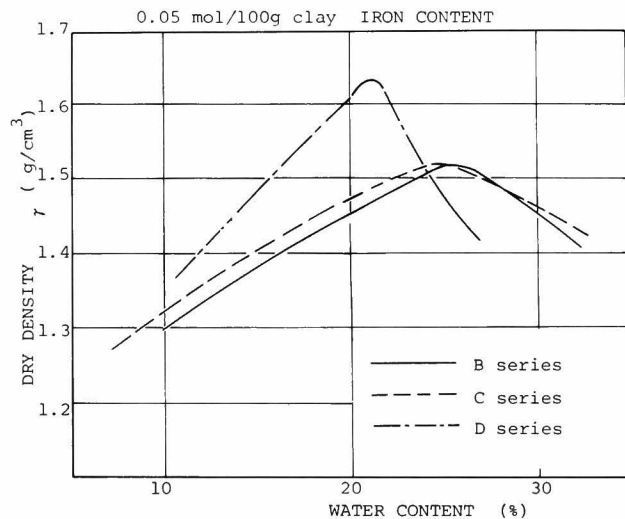


図5-25 複合処理土の締固め特性

有機物による粒子間結合がみられなくなって、せん断強度が減少し保水性も減じたためであると考えられる。

(2) 強度特性

(i) 低含水比の場合

1軸圧縮強度についての結果は図5-26～5-28のとおりである。鉄粉添加量の増大，養生日数の増加とともに q_u は増大している。しかし、これまでの鉄処理，鉄・アルミウム処理とは異なり，30日養生の場合などに q_u の値にピークがみられている。このような強度の減少は破壊のパターンがすべり破壊から分離破壊のように脆性破壊を呈する場合にみられている。D-系統で大きく生じているのは，有機物除去処理に用いた H_2O_2 の残滓が，添加された鉄粉を過度に酸

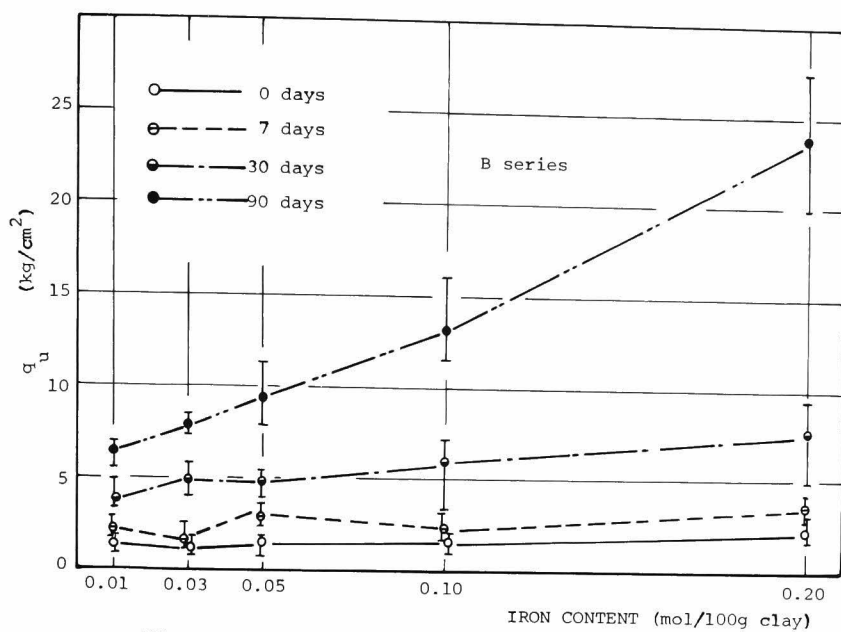


図5-26 複合処理土B-系統の q_u の変化（シール養生）

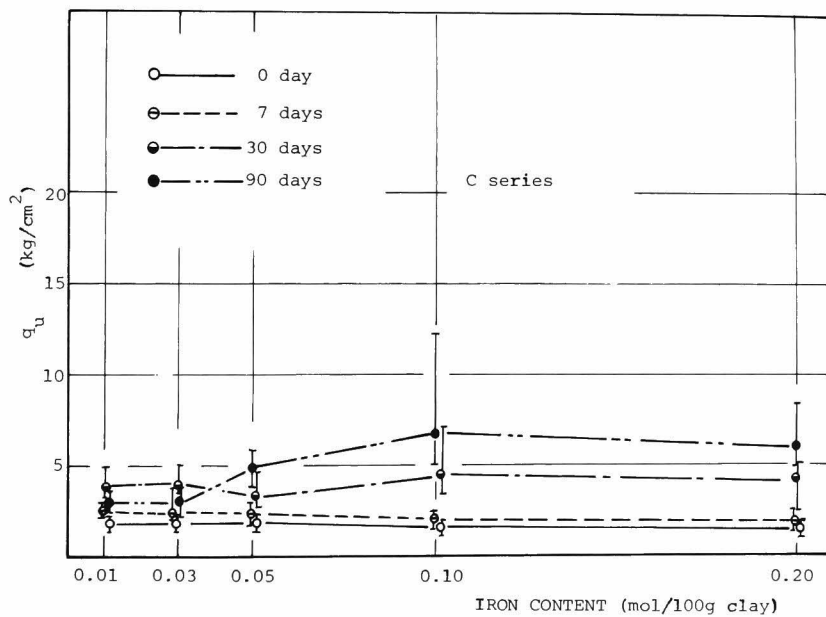


図5-27 複合処理土C-系統の q_u の変化（シール養生）

化して脆性材料化が進行したものと考えられる。

これらの供試体の処理効果を把握するため、同一含水比での q_u 比較が図5-29である。図中の

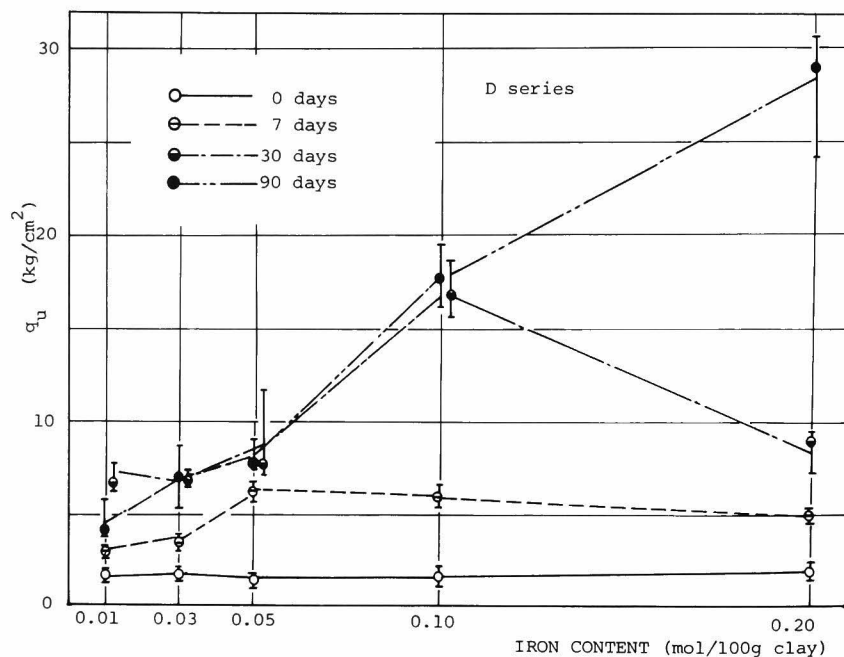


図 5-28 複合処理土 D-系統の q_u の変化 (シール養生)

A 部分が鉄添加による強度増分であり、
B 部分が人工有機凝集剤と鉄粉との相
剰作用による強度増分を示している。
なお実線は未酸化時の q_u -線である。
図から明らかなように、B-系統の q_u
が最も大きくえられている。これは有
機凝集剤と鉄粉の同時添加による相剰
作用のために鉄酸化が促進され、強固
な粒子間結合が生じたためと考えられ
る。

(ii) 高含水比条件の場合

初期含水比 500 % で沈降させた処理
土の、地盤表層と先行荷重 $p_0=0.01$
 kg/cm^2 で圧密したものとの強度特性
を B-系統について検討した。どちら
も超軟弱状態にあり、結果は図 5-30、

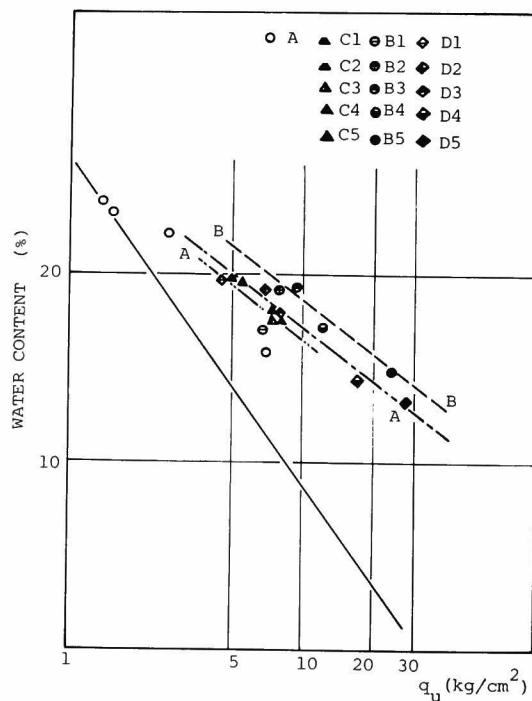


図 5-29 q_u と含水比の関係

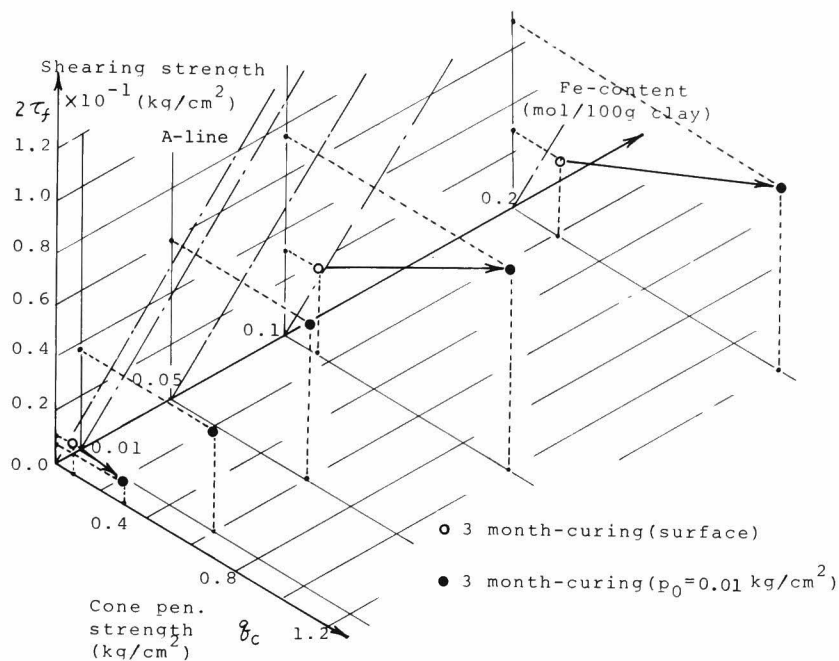


図 5-30 $\tau_f \sim q_c$ 関係

5-31のとおりである。

3ヶ月経過後の含水比は51～59％とはば同一である。3ヶ月後でも表層、 $p = 0.01 \text{ kg/cm}^2$ で圧密されたもの、ともに $2\tau_f = 0.1 \sim 0.01 \text{ kg/cm}^2$ と小さい値でとどまっている。一般に $2\tau_f(q_u) = 1/5 \cdot q_c$ といわれており、図5-30のA-線であるが、図では大きくはずれ、当試料で

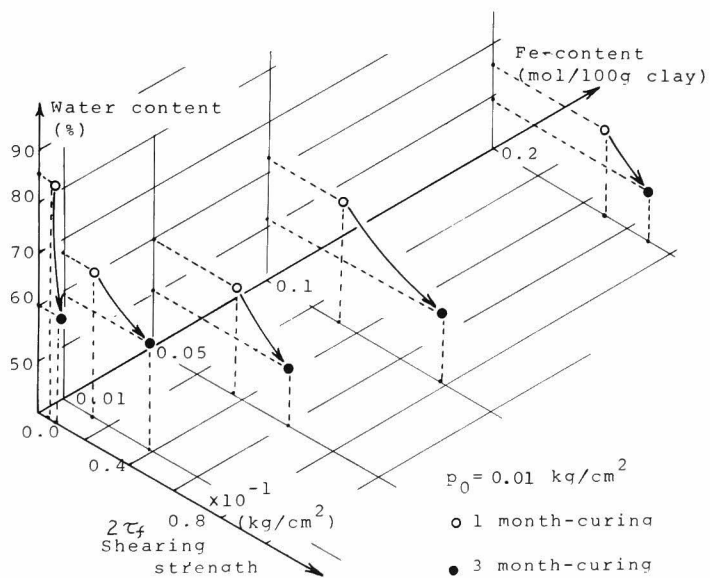


図 5-31 $\tau_f \sim w$ 関係

は q_c の方が大きい値を与えている。図5-31は養生期間の差による強度変化を示している。図中の矢印は含水比の減少に伴う強度増加を意味しているが、鉄イオン添加による強度の増加は明白である。

5.2.5 ま と め

多価カチオン処理土の工学的性質について、特徴的なものを中心に示したが、本節でえられた結果をとりまとめるとつぎのように整理される。

(1) 鉄処理土の改良効果

(i) コンシステンシー特性については F 値で検討した。鉄粉添加量の増大と養生期間の増加に伴って F 値は減少し、処理土は砂質土的な性格を示すようになる。

(ii) 締固め特性では、 γ_d が大きくなるがこれは単に比重の大きい鉄粉を添加したためにすぎないことを補正值 γ_d' を用いて明らかにした。さらに W_{opt} に何らの変化もみられないことなどから鉄粉添加のみでは締固め特性に及ぼす影響はほとんど皆無といえることを示した。

(iii) 1 軸圧縮試験により、 q_u の大きな増加を添加量の増大と養生期間の経過によってえられることを示した。これは添加直後に q_u の増加が生じないこと、鉄添加の効果を含水比変化の影響から分離して表現したこと等に基づき、添加された鉄成分の酸化によってはじめて強度増加作用を発揮することを明らかにした。

(iv) 圧密特性では、降伏値として 1.0 kg/cm^2 の近傍にその存在がみられるなどの固化性状をきたし、2 次圧密量が添加量の増加によって小さくなることを示した。

(2) 鉄・アルミニウム処理土の改良効果

(i) 低含水比における挙動と高含水比における挙動との間に相違がみられる。

(ii) 低含水比条件下ではアルミニウムイオンの添加による強度増加はほとんどみられない。

(iii) アルミニウムイオンによる保水効果が生じている（気乾養生の場合）。

(iv) 鉄・アルミニウムの両イオンの添加量の増大に伴って、強度が増大し含水比は減少する傾向を示す（シール養生の場合）。

(v) 高含水比条件下ではアルミニウムイオンによるベッド化と鉄イオンの酸化による固化とによって、せん断強度の増加がえられており、鉄・アルミニウムの両イオンの相乗効果を期待しうる。

(3) 複合処理土の改良効果

(i) 締固め特性が添加によっても変化を生じないことは(1)、(2)の場合と同様である。しかしながら、有機物除去試料のみに γ_{dmax} の増加、 W_{opt} の減少がみられた。

(ii) q_u は人工有機凝集剤と鉄粉添加において最大値を与えることを $q_u \sim$ 含水比図から明らかにし、複合処理の有効性が示された。

(iii) 高含水比条件の場合においても同様に、添加量の増大と養生期間の経過によって強度を著しく増大させることを示した。

5.3 多価カチオンによる化学的安定処理土の改良のメカニズム⁷⁾

5.3.1 改良メカニズムの研究の手法

前節では多価カチオン処理土の改良効果として、せん断強度の増大を中心に明らかにした。砂質粘土と鉄イオンとの安定処理を取り扱ったものとして Крахмалев (1960)⁸⁾ の研究がみられるが、これは改良効果として土粒子のペッド化を指摘しているのみで、単に予想として述べているにすぎなく改良のメカニズムを追求したものではない。そこで本節においては多価カチオン処理土の改良のメカニズムを明確にするものである。

多価カチオンの添加によって、粘土粒子表面の界面活性に変化を及ぼし、ゼータ電位の減少による粒子間の接触ならびに多価カチオンによる粒子間のセメンテーション作用などが予想される。よって、処理土のペッド化、比表面積の変化、酸化性状、イオン分布、微視的構造等の観点から検討したが、その試験方法をあらかじめまとめると次のとおりである。

(1) ペッド化の測定方法

粘土粒子の界面活性の減少に伴って粒子間に接触が生じ、それによってペッド化が促進される。そこでこのペッド化に着目して処理土の粒度分布、比表面積を測定している。しかしながら固結した処理土の粒度分布の測定は、必ずしも容易ではないことは第4章でも触れたとおりである。同様の手法を用いて統一的に実施した。

気乾試料では固結化が著しく、その粒度分布測定はほとんど不可能であったため、ここではシール養生のものについて粒度分布測定を行った。比表面積は高含水比条件下の試料のみに対して行い、測定はN₂ガス吸着BET法を用いた。そのための試料の作製は含有水分の乾燥時のペッド化を避けるためメチルアルコール置換を行っている。

(2) 酸化性状の測定方法

土中における鉄イオンの酸化性状について、鉄酸化物の形態がきわめて複雑であることを考慮して土中鉄イオン量を2価と3価とにわけて定量し、イオン酸化量の変化を検討している。この場合、分析中に酸化・還元が起こってはならないことはいうまでもない。そこで処理土の溶融分解をCO₂雰囲気中、80℃、HF、H₂SO₄で行い、 α - α' ジピリジル法に基づく発色法を用いた。⁹⁾ なお、検討試料は鉄処理土のシール養生したもので、低含水比条件の場合の1軸圧縮試験後のものである。またこの時の処理土の酸化条件については、別にpHと酸化還元電位E_hとを測定し検証とした。

(3) イオン分布の測定方法

土中での多価カチオンの分布については、土層柱から採取した試料について蛍光X線分析による鉄イオン分布の測定、X線マイクロアナライザーによる分布形状の面分析を実施した。

前者については、液性限界の含水比状態における混合で鉄イオンが試料中に沈積するかどうか

について特に検討したものである。十分練り返した南港粘土試料中に鉄イオンとして $\text{FeSO}_4 \cdot \text{FeCl}_2$, FeCl_3 を試料乾燥重量に対して1.0%, 0.5%となるように添加し, ϕ 15 cm, 高さ20 cmの底つき塩化ビニールパイプに入れ静置して, 1ヶ月間養生したものである。この養生試料を土層柱とみなして, その上部(A), 中部(B), 下部(C)の3ヶ所から採取し測定している。採取試料は炉乾燥後粉砕し (Spex 製粉砕機で粒径 $50 \mu\text{m}$ 以下にする), (セルロース) : (試料) = 5 : 1の割合で希釈混合して, 15 t で圧縮成型したものを分析に用いる。鉄イオンの定量として Fe_2O_3 に換算して行い, 検量線法にもとづいて含有量を決定した。

後者の面分析に関してはX線マイクロアナライザーを用いた。これは走査型電子顕微鏡に接続したエネルギー分散形のものであり, 試料面に電子線が照射されたとき発生する特性X線を S_i (L_i) の半導体検出器で検出し, 波高分析器にかけブラウン管上の観察2次電子像と同調させ, X線強度に応じて輝点で表わしたものである。情報量としては鉄の K_α 線をとっている。なお波高値を一定にして観察しているため輝点数が試料中の鉄成分量の概略値を示すことになる。

(4) 微視的構造の観察手法

多価カチオン処理土の微視的構造については, 第3章と同様に走査型電子顕微鏡の2次電子像の観察によるものであり, 安定処理土中における鉄イオンの酸化にもとづく結晶の状況, 処理土の微視的構造等を検討している。なお, ここではペッド測定を実施していないが, それは多価カチオン, 特に鉄イオンの酸化によるペッド化が, 後述のようにシルト径のものを砂径へとペッド化するものであって, ペッドの変化として第3章でとらえたものより粒径が極端に大きいために電子顕微鏡レベルでのペッド分布としての把握が困難なためである。

5.3.2 改良メカニズムの検討結果と考察

(1) 処理土のペッド化

本研究でとりあげた鉄処理土, 鉄・アルミニウム処理土, 複合処理土の粒度分布はそれぞれ図5-32~5-34のとおりである。計算における土粒子比重は, 鉄粉添加に対してすべてが酸化鉄 (Fe_2O_3 , 比重5.12) になったものとして比重補正している。鉄粉添加量と補正比重値は南港粘土に対して表5-3のようである。ただし添加後1日では酸化はほとんど生じなくて, 添加した鉄粉が独立に沈降するものとして系全体の比重補正は行わない。なお複合処理土のD-系統は有機物減少による比重増大に基づくものである。アルミニウム添加ならびにパ

表5-3 鉄粉添加量と補正比重値

Sample No.	G_s (corrected)
I-1	2.680
I-2	2.690
I-3	2.710
I-4	2.730
I-5	2.778
I-6	2.868
D1	2.740
D2	2.760
D3	2.780
D4	2.828
D5	2.917

(注) D1~D5は複合処理土である

ウムの比重が 2.71 g/cm^3 で土粒子比重と差がないこと等から補正は行っていない。

図5-32の鉄処理土において、添加後1日での粒度分布にほとんど差がみられないのに対して、3ヶ月経過後では添加量の増大に応じて粒子径も大きくなっている様子が読みとれる。特に $50 \mu\text{m}$ 以上の砂径部分の増大が著しく、添加した鉄粉が酸化過程を経ることによって粒子配合の良い土を生じさせている。

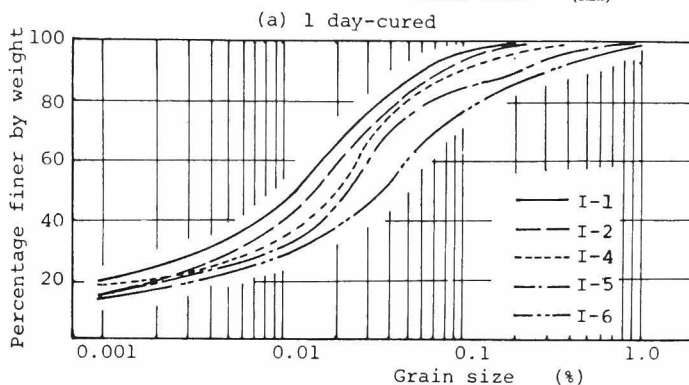
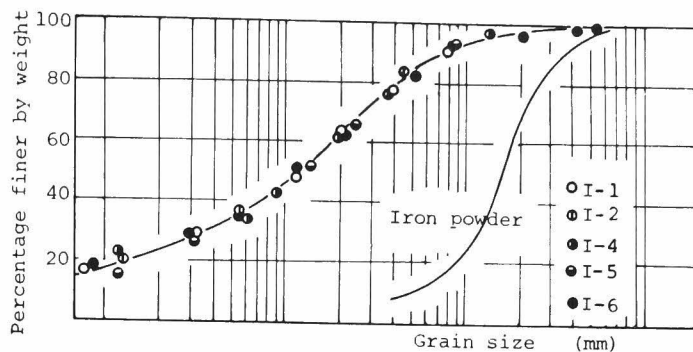


図5-32 鉄処理土の粒度分布

図5-33は、鉄・アルミニウム処理土の場合であるが、無処理のA-1からアルミニウム処理のC-1でPACの凝集作用による全粒径範囲でのベッド化が生じ、鉄粉量の増大で同様に砂径部分のベッド化がきわめて大きいものである。鉄とアルミニウムの両イオンの同時添加による相剰効果が相当大きく与えられている。

さらに複合処

理土の結果を示したのが図5-34であるが、ベッド化はB-系統において最も著しく、ついでD、C-系統の順となっている。

これは前節で示した1軸圧縮強

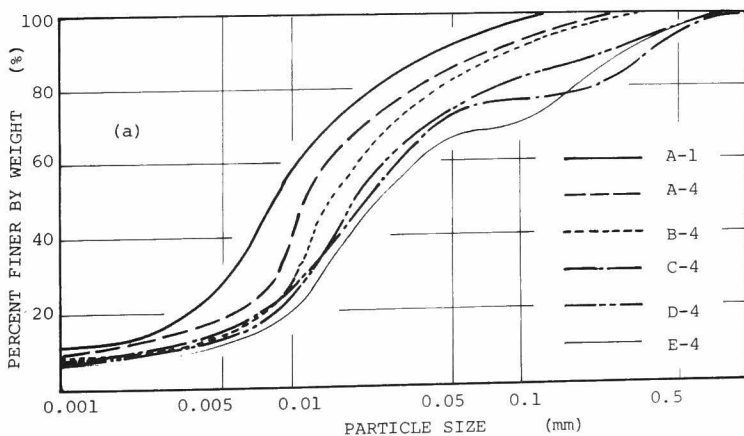


図5-33(a) 鉄・アルミニウム処理土の粒度分布

度発現状況とよく一致している。すなわち、鉄粉と有機凝集剤の両者に基づく強固な粒子間結合の存在が考えられる複合処理土において、ベッド化が顕著にみられ、その結果として1軸強度が最大となるものである。

ところで、粒径加積曲線は粒子沈降から得られる見かけ粒度であり、生じたベッドの実体を表現するものではない。アルミニウムイオンは、PACの形で添加しているので粘土粒子間の物理吸着の促進作用、鉄イオンは酸化にもとづく架橋作用等、両者のベッド化機

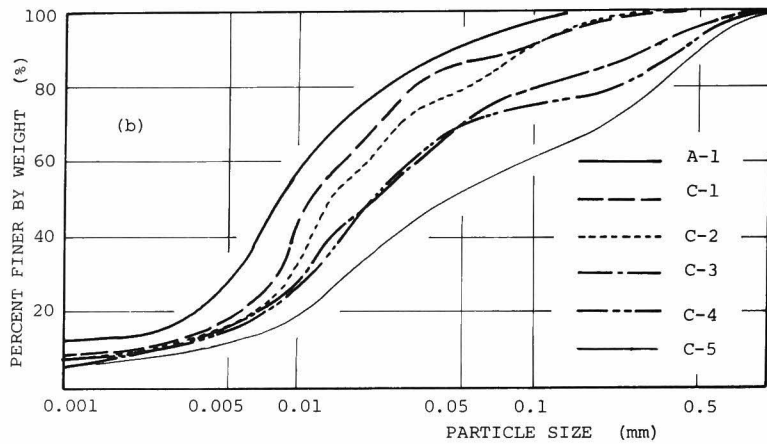


図5-33(b) 鉄・アルミニウム処理土の粒度分布

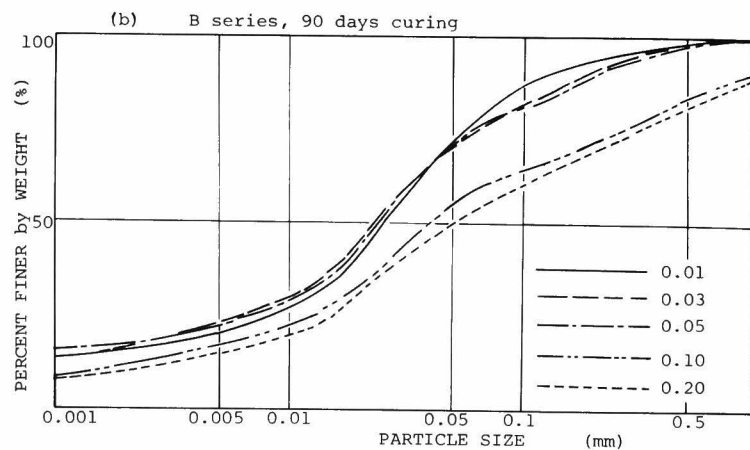
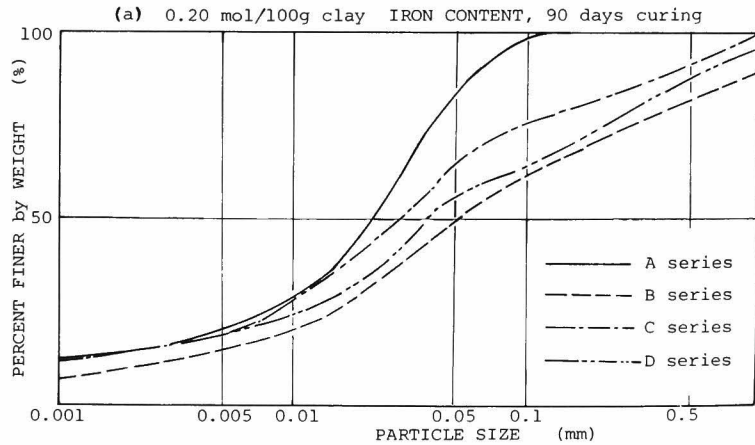


図5-34 複合処理土の粒度分布

構には図5-35に模式的に表わすような相違のあることが予想される。このとき、図5-35(a)では

ベッド化による表面積の増大が、逆に(b)では表面積の減少がみられることになる。なぜなら比表面積は土粒子の外表面積のみならず、結晶格子内の内表面積、ベッド内部の細孔表面積を含む総表面積を示すからである。そこで、鉄・

アルミニウム処理土についてBET法で比表面積を測定したものが図5-36である。試料容器の上部層と下部層とからサンプリングしたものの結果である。また、ベンゼン断試験によるせん断強度との関係を図5-37に示している。実

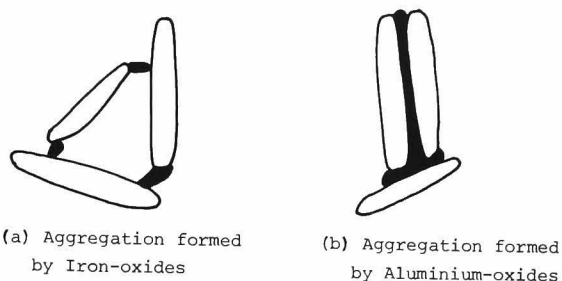


図5-35 鉄イオン、アルミニウムイオンによるベッドの仮想図

測比表面積はアルミニウムイオンの増加で減少し、鉄イオンの増加では逆に増大している。両イオンの添加量はせん断強度と正の相関をもっていることから、さきに仮定した両イオンによるベッド化機構が異なっていることが明らかである。

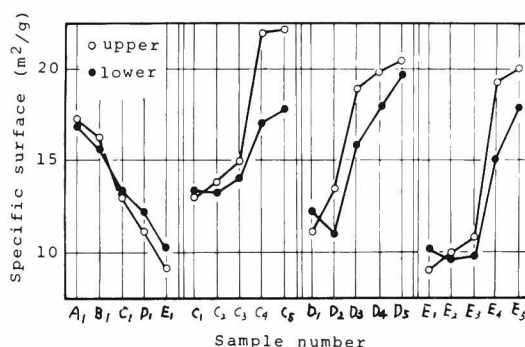


図5-36 鉄・アルミウム処理土の比表面積の変化

(2) 処理土の酸化性状

土中における鉄イオンの酸化性状を

検討したものが図5-38である。鉄粉を添加していない無処理土においても Fe^{3+} 、 Fe^{2+} が存在するのは、粘土試料自体に含有されている鉄成分量である。添加の初期（1週間経過後）に2価鉄が溶出し、その後3価鉄へと変化してゆく様子が明らかになっている。ここでは3ヶ月養生条件までを示しているが、酸化の進行はほとんど停止しており、反応は飽和に至っているものと考えられる。添加鉄粉の60～70%が3価鉄へと酸化されている。また、これらの試料の酸化条件として酸化還元電位の変化を示したものが図5-39である。これは5.1で示したPourbaix図表に対応するものである。pHは添加時において、試料条件（南港粘土は海底から採取しているのでpH 8.2である）に依存する試料表面からのカチオン溶出によってpH 8程度の弱アルカリであるが、時間の経過（10日）とともに鉄粉添加量の大きなものにpHの増大がみられている。酸化還元電位 E_h は無添加

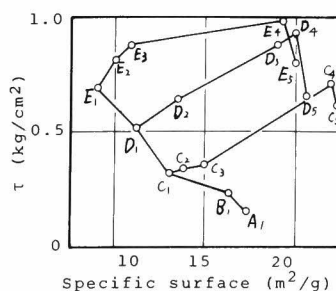


図5-37 比表面積とせん断強度との関係

の場合の+100～+200 mVに対して、0.03～0.05
 モル/100gの鉄粉添加以上で急激な上昇があり、添
 加後3～4日目にして+400～+600 mVに達して
 いる。これは図5-38の酸化性状に示されているよ
 うに、1週間経過後で2価鉄の溶出が大きくなって
 いることを説明しており、処理土が酸化条件にある
 ことを表わしている。

(3) 処理土のイオン分布

土中における鉄成分の分布に関する検討結果はつ
 ぎのとおりである。

まず高含水比条件下における鉄イオンの沈積状況
 については図5-40のようである。添加量0.5%の
 差が図のように分析値では0.1～0.2%程度の差と
 してえられ、絶対量を表わしてはいないので、分布
 の目安とみなすべきものである。バラツキもあるた
 め定性的傾向しかいえないが、土層柱の上部で鉄成
 分量が少なく、下部で増大しているようである。酸
 化の条件としては上部を開放しているので鉄酸化は

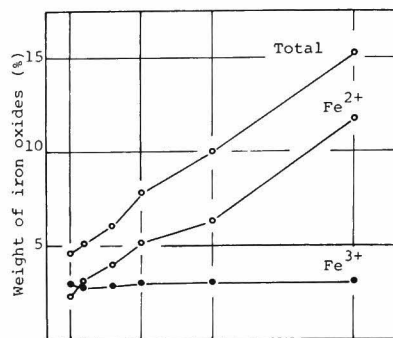
上部の方が生じやすいが、高含水比条件下では酸化鉄として下部へ沈積する傾向を示している。

一方、低含水比条件として、締固めた試料を1軸圧縮試験し、その破壊面における鉄成分の分
 布を面分析したものが写真5.1、5.2である。写真5.1の無添加の場合には含有される鉄成分が
 ほぼ均一分布しているのに対し、写真5.2の処理土ではある点への集中がみられている。これは

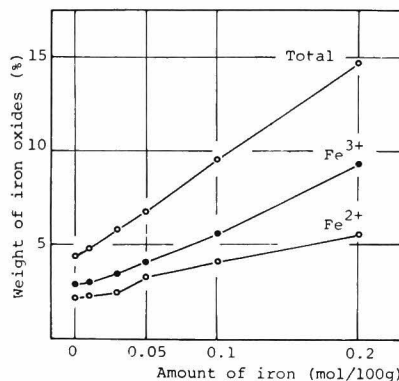
さきのイオン分布の沈積ほどで
 はないが、鉄粉の実験室的均一
 混合においても酸化鉄の分布に
 微視的偏差のあることを表わし
 ている。しかし巨視的な処理土
 の強度に関しては、分布の偏差
 にもかかわらず土層全体として
 強度発現をもたらすものである。

(4) 処理土の微視的

構造の観察



(a) 1 week-cured samples



(b) 3 month-cured samples

図5-38 鉄イオンの酸化性状

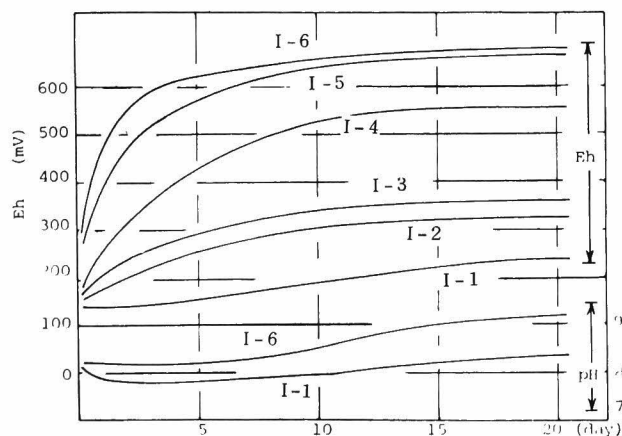


図5-39 EhとpHの変化状況

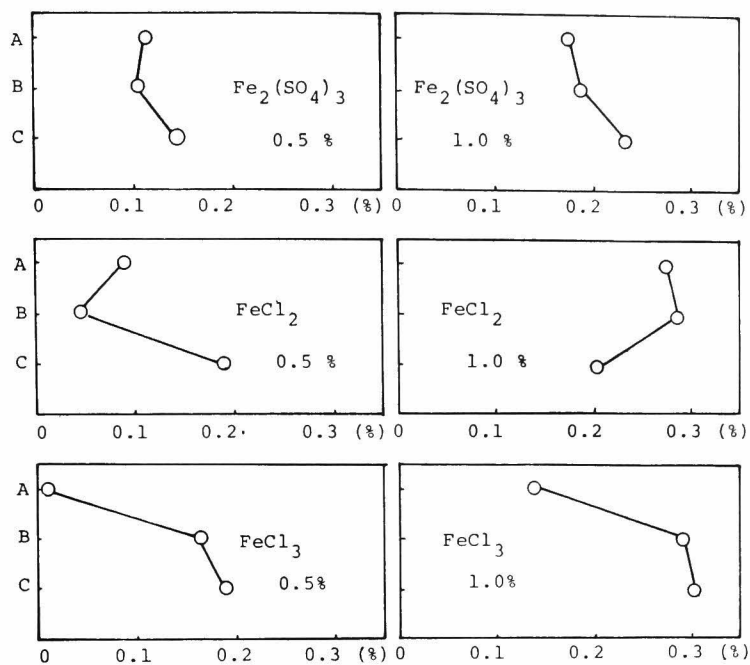


図5-40 土層内での鉄イオンの分布

走査型電子顕微鏡による鉄成分と粘土粒子との相互作用の微視的観察結果は写真5.3～5.11のごとくである。写真5.3～5.6には供試体中にみられた酸化鉄の結晶を示した。針状結晶であることから、得られた例はゲタイトを表わすものである。

ただこれは例であ

って土中の鉄粉がすべてゲタイトに変化したものではなく、さきに述べたように酸化鉄の形態は単一の結晶として存在するものではない。写真5.7は圧密V-断面の状況をみたものであるが、写真の中央付近に酸化鉄の集積がみられる。写真5.8, 5.9は1軸圧縮試験のせん断破壊面を示しているが、すべり面にはペッド部分による凸部とその接点部の凹部とがよく生じている。さらに写真5.10, 5.11では棒状の酸化鉄による架橋の様子が示されている。ペッド化は試料の全体にわたって生じている。

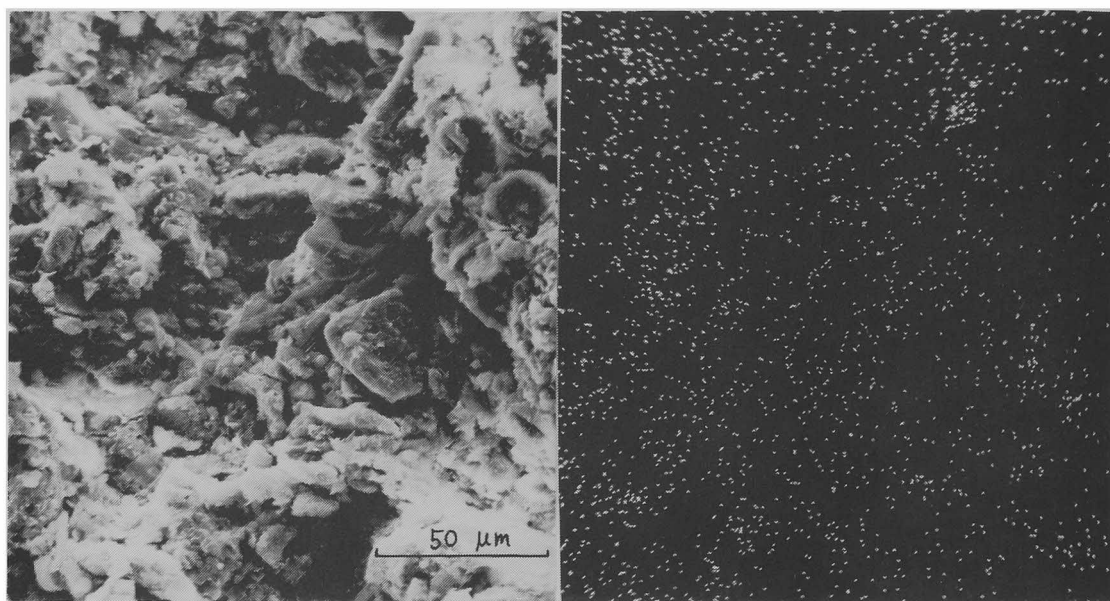


写真 5.1 鉄未処理土（I－1）中の鉄イオンの分布
Fe- K_{α} 図 $\times 500$

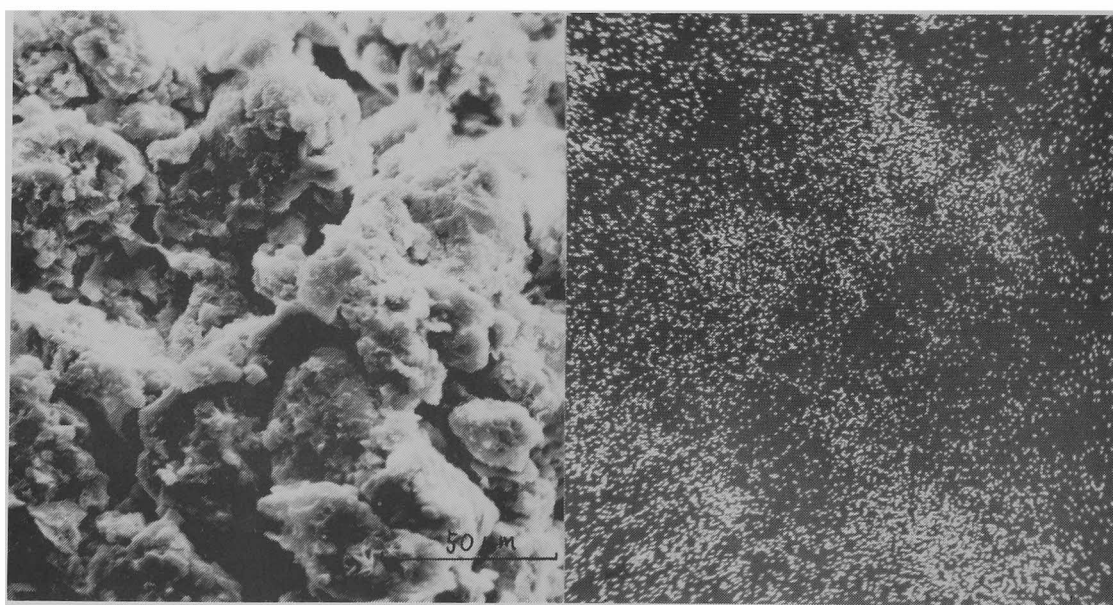


写真 5.2 鉄処理土（I－6）中の鉄イオンの分布
Fe- K_{α} 図 $\times 500$

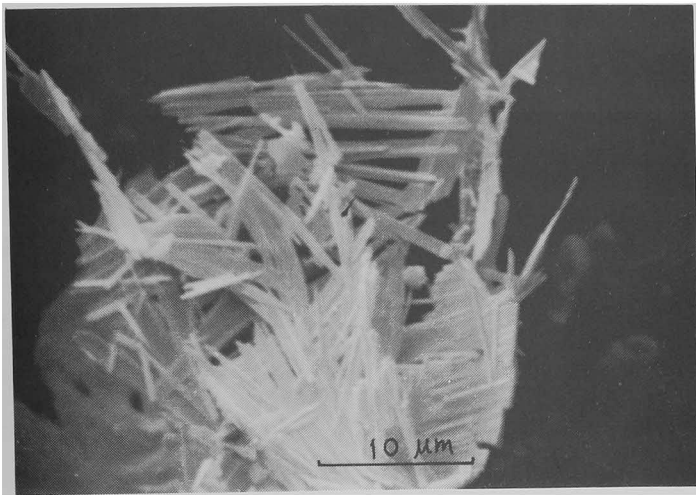


写真 5.3
処理土中の酸化鉄結晶
× 2000

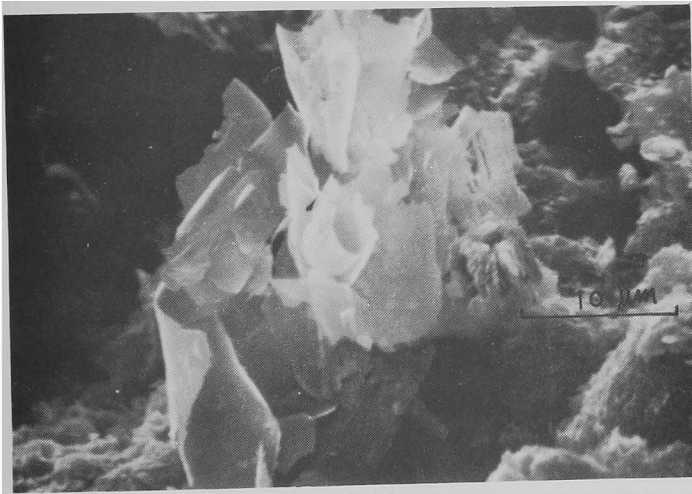


写真 5.4
処理土中の酸化鉄結晶
× 2000

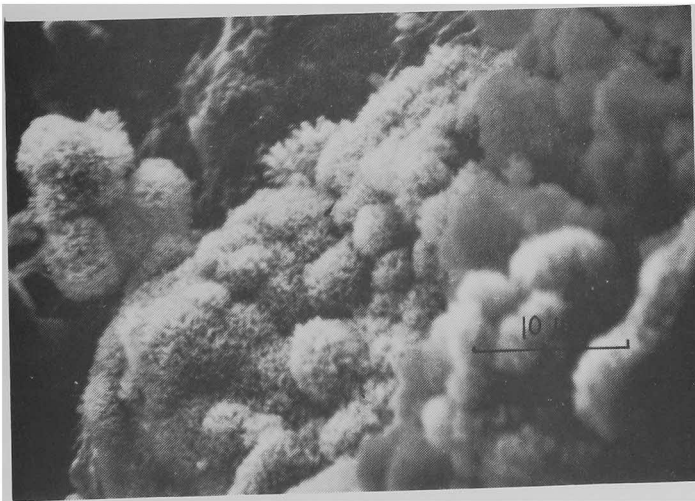


写真 5.5
処理土中の酸化鉄結晶
× 2000

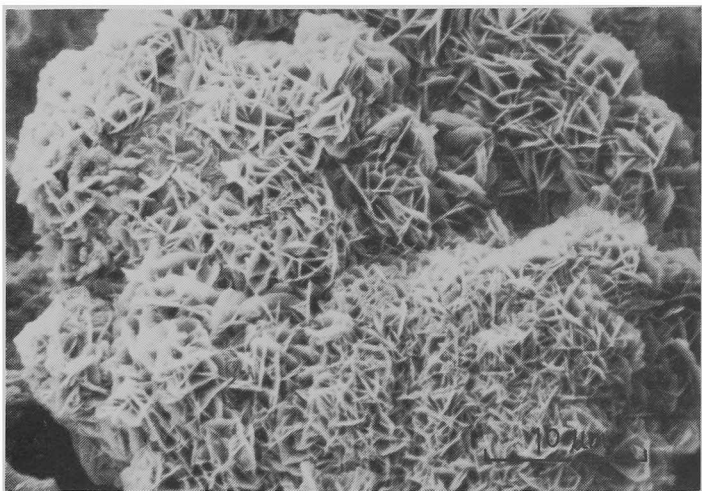


写真 5.6
処理土中の酸化鉄結晶
× 2000

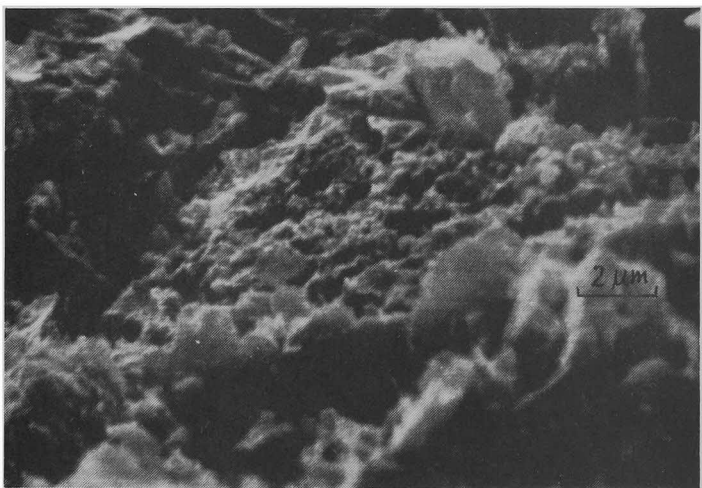


写真 5.7
I - 3 試料の圧密V-断面
 $p=12.8 \text{ kg/cm}^2$, 中央に
鉄酸化物 × 5000

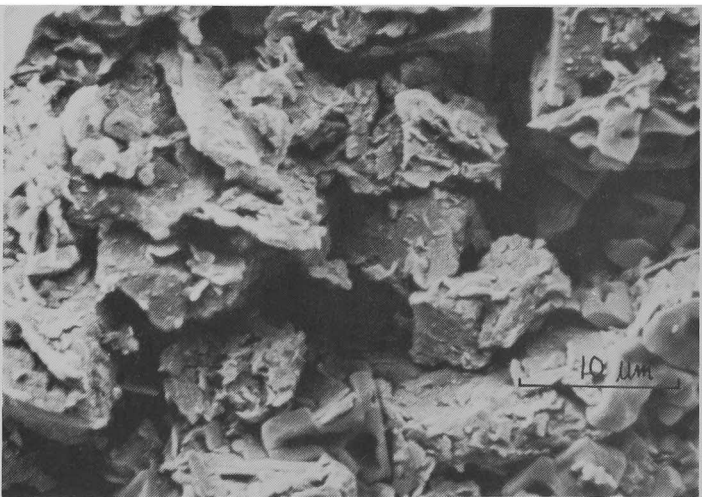


写真 5.8
I - 3 試料の 1 軸圧縮
すべり面 × 2000

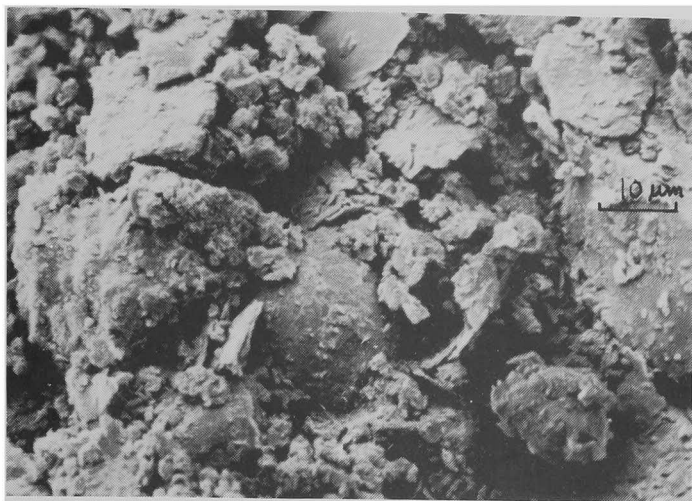


写真 5.9
I - 6 試料の 1 軸圧縮
すべり面 $\times 1000$

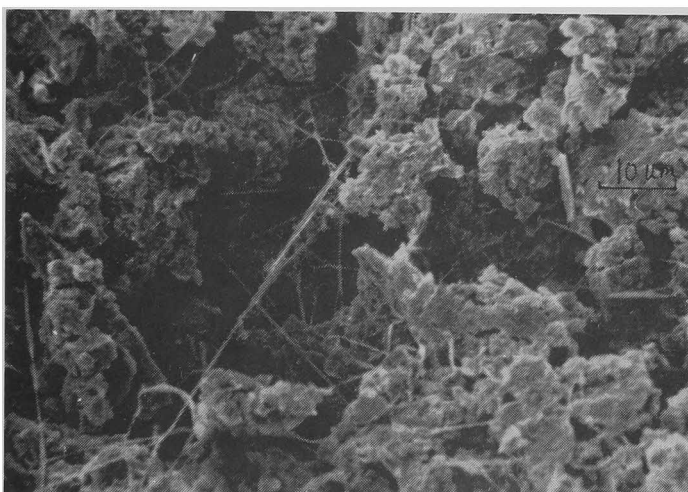


写真 5.10
I - 6 試料の圧密 H-断面
 $p = 0.4 \text{ kg/cm}^2$
 $\times 1000$



写真 5.11
I - 6 試料の圧密 H-断面
 $p = 3.2 \text{ kg/cm}^2$
 $\times 5000$

5.3.3 ま と め

本節でえられた結果をとりまとめると、つぎのように整理される。

- (1) 多価カチオン処理土の改良効果は主としてベッド化作用に帰することができる。
- (2) 鉄処理土については、その酸化特性に着目することによって改良効果を表現しうる。酸化に基づくベッド化は砂径部分の増大が大きいものである。
- (3) 鉄処理土とアルミニウム処理土とはその改良メカニズムが異なっており、それぞれ鉄イオンの架橋作用とアルミウムイオンの吸着作用によるものであり、鉄・アルミニウム処理土では両者の相剋効果を期待することができる。そして、これを粒径加積曲線と実測比表面積との差異から明らかにした。
- (4) 複合処理土においても鉄粉と有機凝集剤によるベッド化が著しく、これは鉄イオンの単独処理よりも効果が大きく、1軸圧縮強度の増大とよく対応している。
- (5) 鉄処理土の酸化性状は、鉄粉添加の初期（1週間経過）に2価鉄が溶出し、その後3価鉄へと変化してゆく。約3ヶ月で酸化はほぼ飽和に至っている。
- (6) 土中における鉄イオンの分布特性としては、高含水比条件下で酸化鉄の沈積があり、低含水比条件下の均一混合においても微視的な偏差がみられる。
- (7) 微視的な構造を走査型電子顕微鏡で追求し、一部に形成される酸化鉄の結晶の存在を示した。

5.4 結 論

本章では、無機成分に基づく新しい土質安定処理工法の開発のため、多価カチオン、特に鉄イオン・アルミニウムイオンの超軟弱粘土中での挙動を追究し、安定処理工法への展開をめざしたものである。

第1節では、これまでの土中有機物の作用に関する検討とは趣きを異にして、土中铁成分の機能に関する予測に基づいた本研究への取り組みの動機を示し、多価カチオンの接着作用が超軟弱粘土においてベッド化をもたらし、地盤安定上の効果が考えられることを提示した。そこで多価カチオン中では鉄イオンに焦点を絞り、金属鉄の酸化（腐食）機構を説明して、土中における鉄酸化物の存在形態についてのこれまでの報告を簡単にまとめた。

第2節では、多価カチオンを超軟弱粘土中に添加したときの工学的性質の変化を明らかにした。ここでは鉄イオンのみの場合、鉄・アルミニウムイオンの場合、鉄・有機物（パンフロックなど）の複合処理の場合の3つのケースについて検討した。

まず鉄処理土の場合ではつぎのようである。コンシステンシーを F 値で整理したが、養生によって大幅に液性限界が減少し、鉄イオン処理によって粘性土が砂質土化をきたすものである。締固め特性では締固め曲線にほとんど変化がみられず、添加鉄による重量増加のみを示しており、

鉄イオンを添加するという事象のみでは何らの変化も生じないものである。強度特性では q_u がイオン量の増大・養生期間の増加に伴って大きく増大することを示した。さらにこのような強度増大は含水比の変化に依存するものではなく、鉄イオンの酸化によってはじめて生じるものであることを明らかにした。圧密特性では予備圧密(p_0)によって処理土に骨格構造が形成され、降伏荷重(約100倍の p_0 に相当する)を生じるようになる。さらに、2次圧密量は減少し、取り扱いやすい土質条件がえられるものである。

鉄・アルミニウム処理土の場合でも同様の結果がえられており、多価カチオン添加量の増加によって強度特性の改良効果が増大するものである。ただ、改良効果は試料の初期含水比に対応して変化をきたしており、高含水比条件ではアルミニウムイオン、低含水比条件では鉄イオンの作用が卓越的に強度増加に貢献するものである。これら両イオンでは相剰作用による強度促進もみられており、安定処理としてきわめて有効であることが知られる。

複合処理土の場合でも人工有機物によるベッド化作用と鉄イオンによるベッド化(固化)作用とによって強度増大・物性改良がえられている。

第3節では、これら多価カチオンによる安定処理土の改良メカニズムについて検討し、その強度増大作用の原理を明らかにした。まず処理土のベッド化については、粒度分布と比表面積等によって示し、多価カチオンの効果が養生期間の増加による酸化に基づいたベッド化によってもたらされることを、粒度分布の変化状況と強度増大との関連から述べた。また鉄イオンとアルミニウムイオンにおけるベッド化では、それぞれの結合機構が異なることを模式図で仮想的に示し、これを比表面積測定結果の対応性と強度特性の変化とによって明らかにした。さらに鉄イオンの酸化メカニズムを検討し、酸化に至るまでの界面の条件、イオン形態、イオン分布、土中の鉄酸化物の結晶の状況などを示して、多価カチオン処理土の物性改良のメカニズムを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎, 嘉門雅史: 鉄イオンによる軟弱粘土の安定処理, 材料, 26巻, 290号, 1977, pp.1034 ~ 1040.
- 2) Pourbaix, M.: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Pergamon Press, 1966.
- 3) 日本材料学会編: 材料の腐食と防食の工学, 1972, pp.14 ~ 25.
- 4) 井上勝也: 錆との戦い, 三省堂, 1969, pp.20 ~ 46.
- 5) Oades, J.M.: The Nature and Distribution of Iron Compounds in Soils, Soils and Fertilizers, Vol.26, No.2, 1963, pp.69 ~ 79.

- 6) Bernal, J.D., Dasgupta, D. R. and Mackay, A. L. : The Oxides and Hydroxides of Iron and their Structural Inter-relationships, Clay Mineral Bull., Vol.4, 1959, p.15.
- 7) Matsuo, S. and Kamon, M. : Engireering Properties of the Inferior Clayey Soil Material and its Improvement, Proc.1st Aust. Conf. Engineering Materials, 1974, pp.385 ~ 410.
- 8) Крахмалев, А. И. : К Вопросу Закрепления Плывунов, Уголь, № 12, 1960.
- 9) 土壤養分測定委員会編：土壤養分分析法，養賢堂， 1971， p.317.

第 6 章 結 論

本研究は、超軟弱粘土という工学的材料としてはきわめて特殊な状態にある土質材料を選び、その今日の問題点を整理して工学的な処理・処分の道を示したものである。

超軟弱粘土の安定処理に関するこれまでの研究は、その反応機構にはほとんど考究されず、単にえられる効果のみを求めるものが多かった。そこでは科学的な裏付けがなくて取り組まれるから場当たりのな解決にとどまることが多く、以後の発展は望むべくもないものであった。

そこで本研究では、超軟弱粘土の組成分析ならびに基礎的諸性質の検討から出発して、粘土粒子の物理化学的な作用に基づく配列という観点から微視的構造を明らかにした。そしてこれらの知見や手法を用いて、土中有機物である微生物の作用に基づく粘土粒子のベッド化現象、添加した多価カチオンの酸化による固化現象などに着目して、処理土の工学的性質の改良の過程を安定処理機構との関連から明らかにし、この新しい安定処理方法の有効性を示したものである。

著者の示した物理化学的アプローチによる土の物性研究の手法は、今後の土質安定処理工法の研究開発において有用な知見を与えると考えられ、さらに基本的検討項目であった土の微視的構造に関する研究は、土の応力一ひずみ特性の確立のための機構解明に容易に用いられうるものである。

ここにおいて、改めて本論文の全体の要旨を概観して、各章ごとに研究の骨子を明らかにする。

第 1 章では、超軟弱粘土の定義を示し、いわゆるヘドロがその代表とみなされるものであることから、ヘドロの定義・分類・分布とヘドロ問題の現状とを明らかにした。そしてこれらヘドロ問題の処理・対策として、ヘドロの浚渫と埋立ならびに脱水・固化に関する要点をとりまとめ、ここで取り扱う新しい物理化学的土質安定処理方法の取り組みの背景を述べた。さらに序論のしめくりとして本研究を概観し、その構成を示して各章間の関連性をあらかじめ明らかにした。

第 2 章では、超軟弱粘土として大阪ヘドロを選び、この組成分析と基本的な工学的性質に関する情報をえた。特に、ヘドロの有機成分、無機成分、界面成分のそれぞれを明らかにすることによって、ヘドロがカオリナイト系粘土鉱物を主成分とした沖積粘土の延長線上にあるものと結論することができた。さらにヘドロ中の有機成分が工学的性質に重要な影響を及ぼしていることが沈降性状や圧密・強度特性の検討を通じて明らかになり、有機成分ならびに界面成分による粘土粒子のベッド化がその中心とみなされるものである。そこでこのような巨視的考察に対して、微視的な土構造をベッド化のメカニズム究明と土質安定処理への展開を課題として第 3 章以降で取り扱った。

第 3 章では、超軟弱粘土の工学的性質の微視的考察として土の構造を取り上げ、粘土粒子のペッ

ド化における配列状況，力学的な作用下でのベッドの変形等を定性的・定量的に考察して，土の応力一ひずみ関係の基礎的な知見をえるとともに，物理化学的土質安定処理における反応メカニズムの把握のための構造の研究手法の確立につとめた。特に定量的表現としては，個々の粘土粒子の配列変化に対して M 値で表わし，構造全体のベッドの変化についてベッドとポアの形状・径・面積などで示すことにより，土の工学的性質の変化の微視的な表情を知ることができた。

第4章では，超軟弱粘土中の有機成分が粘土粒子をベッド化させているという第2章で明らかにされた成果をうけて，このベッド化作用が超軟弱粘土の安定処理としてきわめて有効であることから，有機物の種類と量の変化に基づく工学的性質の改良効果を検討したものである。まず，土中有機物の総量の変化に対しては，強度特性において大きなせん断強度増大効果がみられることから，この作用を人為的に促進させる手段として，土中微生物による生化学的安定処理手法の開発を行った。微生物は添加する微生物種と，栄養源，環境条件などを設定することによって，その繁殖を容易に管理することができることに着目するものである。超軟弱粘土の圧密・強度特性などの工学的性質の改良に，一般微生物種の接種が最も効果が高く，かつ代謝生成物質による粘土粒子のベッド化促進作用も大であることが明らかになった。なおこのような改良メカニズムについても，物理化学的検討手法を設定して，その吸着などの反応性，ベッド化の状況などを知ることができた。

粘土粒子のベッド化は土中の有機物によってのみ生じるものではなく，非晶質，例えば鉄・アルミニウムの酸化物などの無機物による作用も有力であることが考えられ，第5章において多価カチオンによる土質安定処理への応用性について検討した。なかでも鉄イオンの酸化に伴う接着作用（ベッド化にはかならないが）に着目して，工学的性質の改良の程度，強度発現のメカニズム等を検討し，添加した鉄イオンの酸化によってはじめて改良効果がえられることを明らかにした。また鉄・アルミニウムイオンによる安定処理も取り上げ，この両イオンによるベッド化機構が初期含水比条件によって異なることを微視的考察に基づいて示した。しかし工学的性質の改良のためには相剰効果を期待しうること，さらに鉄イオンは有機物（パンロック）の併存下においても酸化促進による大きな強度増大をえられることなどを明らかにした。

本研究で示した2つの土質安定処理方法は，物理化学的ならびに生化学的な反応や作用に着目した新しい手法であり，超軟弱粘土のベッド化促進に基づく安定処理という点に共通点を有するものである。また，すでに述べたように超軟弱粘土はローカルに変化に富むものであるが，ここで示した物理化学的手法を適用することによってその本質を容易に理解することが可能であり，適切な処理・対策を講じることができるものである。

今後の研究課題として，提出した2つの土質安定処理方法が，実験室内での効果の確認にとどまっているので，これを工法として確立させるために現場での試験施工を実施する必要がある。

実レベルでの検討をえて、はじめて設計法としても成り立つものである。また微生物による土質安定処理では、長期安定性の点で未確認の事象を残しており、一層の検討を要するものである。さらに混合攪拌の手法についても、既に凝集沈殿工法として手法の確立されているポンプ船による埋立時の添加混合の場合を除いて、合理的な混合工法の開発が求められるものである。

謝 辞

本論文は著者が京都大学大学院工学研究科の修士・博士課程に在学中及び土木工学教室に奉職以降の研究の成果をとりまとめたものである。この間、指導教授として終始懇切な御指導と御鞭撻を賜った京都大学工学部教授工学博士松尾新一郎先生に対し衷心より感謝の意を表する次第である。松尾先生は超軟弱粘土の物性を物理化学的な見地からアプローチすることを積極的に支持され、これを土質安定処理へ展開することを示唆された。またこのような研究のためには、必然的に多くの分析装置を要するものであるが、著者の依頼に対して最新の機器を提供していただいた。これらを使いこなすためには少なからぬ技術的障害を伴うが、先生の御厚情はこれを克服するための大きな原動力となったものである。

著者はまた、松尾先生が委員長をされていた土質工学会所属の超軟弱地盤研究委員会の委員の方々にも心から感謝したい。昭和48年から52年までの4年間にわたり、超軟弱地盤の物性と対策について、研究面から実務の現状まで広範な分野にわたる種々の示唆と最先端の情報をうるることができたものである。

研究の実施に際して多くの方々の御協力をえた。特に第4章4.3の微生物による生化学的処理においてはPham Ngoc Lan氏の絶大な御尽力の賜物である。記して感謝の意を表わしたい。

最後に、ともに勉学に励み、本論文の実験・計算に御協力をいただくとともに、良好な研究環境を創出していただいた京都大学工学部土木工学教室土質力学研究室に関係の各位に心から感謝するものである。

